

# Anwendung der elektronischen Speckle Interferometrie zur Beschreibung der Rißprozeßzone von Beton im jungen Alter

Kennwort "Bruchmechanik, ESPI"

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben von

Dipl.-Phys. K. Hariri

Forschungsleiter:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. F.S. Rostásy

Januar 1999

IBMB  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Materialprüfanstalt für das Bauwesen  
TU Braunschweig

Das Vorhaben wird seit dem 1.1.1994 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (Az. Ro 288/30-1/2)

## Vorwort

Mit Schreiben vom 13.12.1993 und vom 9.10.1995 genehmigte die Deutsche Forschungsgemeinschaft Sachbeihilfen für das Forschungsvorhaben "Anwendung der elektronischen Speckle Interferometrie zur Beschreibung der Rißprozeßzone von Beton im jungen Alter" unter Az. Ro 288/30-1/2. Das Ziel des Vorhabens lag in der Erfassung und Charakterisierung der räumlichen Ausdehnung der Rißprozeßzone zug- und biegezugbeanspruchten Betons in Abhängigkeit verschiedener Versuchsparameter. Die Erfassung erfolgte mittels elektronischer Speckle-Muster Interferometrie (ESPI). Diese Ganzfeldmethode erlaubt die Erfassung von Verschiebungs- und Dehnungsfeldern in berührungsloser, zerstörungs- und rückwirkungsfreier Weise. Dieser Abschlußbericht stellt Versuchsergebnisse, Modellierung und numerische Verifizierung experimentell ermittelte Daten zusammen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Sachbeihilfen bedanken. Desweiteren sei Herrn K.-H. Sprenger für seine vielfältigen Anregungen und Umsetzungen versuchs- und meßtechnischer Probleme und die sehr gewissenhafte Versuchsdurchführung gedankt.

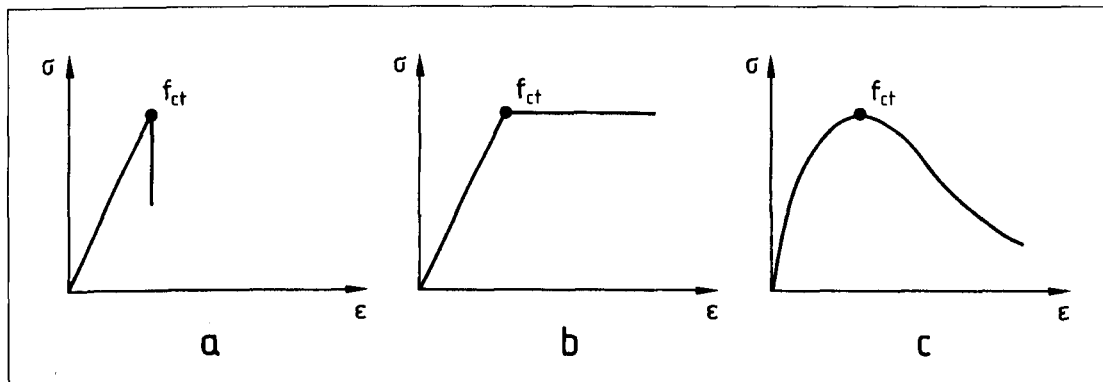
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. F.S. Rostásy

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Bruchmechanik mineralisch gebundener Werkstoffe</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Programm, Prüf- und Meßtechnik der eigenen Versuche</b>	<b>6</b>
3.1	Versuchskörper . . . . .	7
3.2	Prüfeinrichtung . . . . .	7
3.3	Versuchsdurchführung und -steuerung . . . . .	10
3.4	Speckle Interferometrie . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>12</b>
4.1	Überblick . . . . .	13
4.2	Ergebnisbeispiele von Kerbzugversuchen . . . . .	13
4.3	Ergebnisbeispiele von Versuchen an gekerbten Biegebalken . . . . .	13
4.4	Einfluß des Hydratationsfortschritts auf die Entwicklung der Rißprozeßzone . .	16
4.5	Einfluß des Größtkorns auf die räumliche Ausdehnung der RPZ . . . . .	19
4.6	Einfluß der Betonfestigkeit auf die RPZ . . . . .	21
4.7	Einfluß der Probengröße auf die RPZ . . . . .	21
4.8	Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die RPZ . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Numerische Verifizierung der Versuchsergebnisse</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>33</b>

## 1 Einleitung

Die Bruchmechanik ist die Kontinuumsmechanik fehler-/rißbehafteter Körper. Versuche beweisen, daß Beton unter Zug- oder Biegezugbeanspruchung kein ideal-spröder sondern ein quasi-spröder Stoff ist (Abb. 1.1). Bei zentrischer Zugbeanspruchung eines beidseitig gekerbten Betonprismas — Kerbe zur Rißlokalisierung — wird im verformungskontrollierten Versuch nach dem Erreichen der Maximalspannung eine allmähliche Entfestigung beobachtet. Entsprechende Beobachtungen werden auch beim gekerbten Biegebalken gemacht.



**Abbildung 1.1:** Spannung-Dehnungslinien für a) ideal-spröde, b) elastisch-plastische und c) quasi-spröde Baustoffe

Die Ursachen für die Entfestigung (strain softening) ist in der Heterogenität des Betongefüges zu suchen. Das Fortschreiten eines Makrorisses durch die Zementmatrix wird an Zuschlagkörnern und Defekten blockiert. Er wird umgelenkt, in mehrere Risse verzweigt und sogar gestoppt. Dabei wird ein Teil der potentiellen Energie in Verlustenergie verwandelt (plastic fracturing). Versuche zeigen, daß der Zugbruch von Beton, im Gegensatz zur Vorstellung der Linear-Elastischen Bruchmechanik (LEBM), nicht mit einem diskreten Einzelriß sondern mit einer Rißprozeßzone (RPZ) zu verknüpfen ist. Diese muß man sich als ein von Mikrorissen durchsetztes Betonvolumen vorstellen. Über die Ausdehnung des Betonvolumens gibt es erst vage Vorstellungen. Z.P. BAŽANT & B.H. OH [2] und G. IVÁNYI [20] geben als Breite der RPZ 2 bis  $3 \times$  Größtkorndurchmesser an. Der experimentelle Beweis hierzu fehlt bislang, obgleich die Größe der RPZ für die Werkstoffmodellierung eine Schlüsselrolle spielt.

Zum Studium des Zugbruchverhaltens von Beton wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen angestellt. Diese verfolgten zum einen werkstoffphysikalische Ziele wie die Klärung des Prozesses abhängig von der Betonstruktur und zum anderen dienten sie der mechanischen Modellierung des Prozesses, um dann das Spannung-Verformungsfeld eines belasteten Bauteils bis zu dessen Versagen beschreiben zu können.

In Anlehnung an die experimentellen Arbeiten zur Bruchmechanik der Metalle und keramischen Werkstoffe verwendet man bei Beton Versuchskörper einfacher Geometrie und Deutbarkeit (Dreipunktbiegebalken, CT-Probe, etc.). Kerben normal zur Hauptzugspannungsrichtung zeichnen den Ort des Bruchrisses vor. Meist wird der Bruchmode I zugrunde gelegt. Die meisten Autoren verwenden zur Verformungsmessung im Rißbereich DMS und/oder Wegaufnehmer, die parallel zur Zugspannungsrichtung angeordnet werden. Zur integralen Messung der Längsverformung in der und über die RPZ wurde die Basislänge variiert, um so indirekt einen Einblick über die Dehnungsverteilung in der RPZ zu erhalten. Steile Dehnungsgradienten u.a. sind auf diese Weise nicht feststellbar. Auch werden wegen der ausgewählten Richtung die Hauptdehnungsrichtung und somit die Ausbreitung der RPZ auf der Körperoberfläche nicht erfasst.

Hier setzt das Ziel dieser Forschungsarbeit an. Mittels experimentellen Untersuchungen an Kerbzugkörpern und an gekerbten Biegebalken unterschiedlicher Betonzusammensetzungen und variierender Probengrößen wird die Ausdehnung der Rißprozeßzone von jungem Beton in Abhängigkeit vom Betonalter ermittelt. Die Vermessung der RPZ gelingt durch den Einsatz einer hochauflösenden, berührungslosen und rückwirkungsfreien optischen Meßtechnik: die elektronische Speckle Muster Interferometrie.

Aufbauend auf den Versuchsergebnissen wird versucht eine Modellierung der RPZ-Ausdehnung zu finden. Die Verifizierung erfolgt am gekerbten Balken im Dreipunktbiegeversuch mittels eines eigens implementierten Lamellenmodells. Das untersuchte Bauteil wird in horizontalen Schichten diskretisiert. Die Annahmen der ebenen Dehnungsverteilung führen zu einer äußeren rechnerischen Beanspruchung, die mit den Versuchsergebnissen verglichen wird. Ebenso erfolgt ein Vergleich zwischen rechnerisch lokalisierten Dehnungen an ausgewählten Positionen und deren experimentellem Pendant in Form von Dehnungsermittlungen mittels Dehnungsmeßstreifen.

## 2 Bruchmechanik mineralisch gebundener Werkstoffe

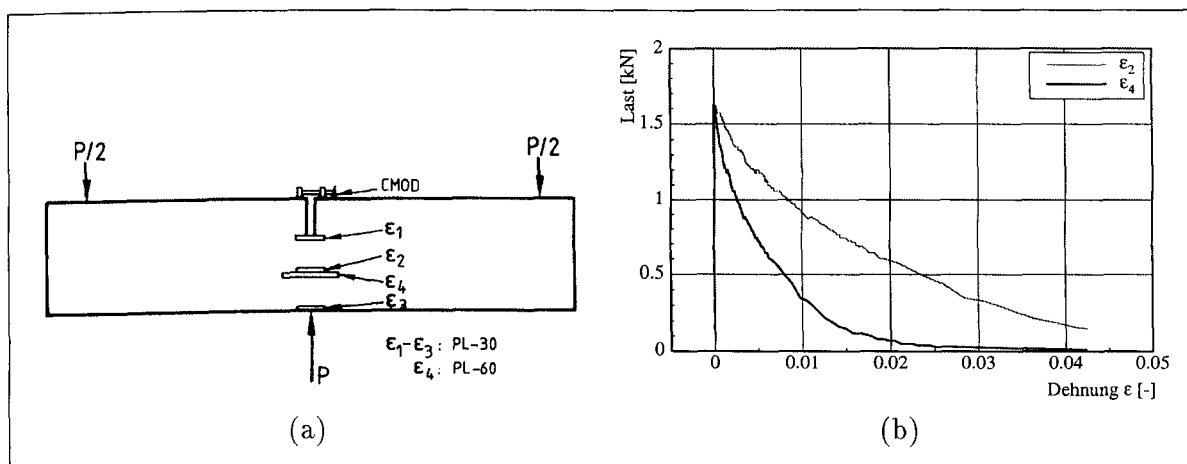
Die Bruchmechanik nach GRIFFITH [12] stellt eine Lehre dar, die sich mit den Vorgängen des Trennens und Brechens von Festkörpern befaßt. Sie bietet eine wirksame Methode, den Rißfortschritt eines Baustoffes ingenieurmäßig zu analysieren und zu beschreiben. Anfang des Jahrhunderts kann GRIFFITH eine quantitative Beziehung zwischen der kritischen Normalspannung und der Rißgröße von Glas formulieren. Grundlage seiner Bruchtheorie ist die Annahme eines glatten ebenen Risses in einem linear-elastischen Werkstoff. Bei den hieraus entstehenden Kriterien der linear-elastischen Bruchmechanik, die bei homogenen, ideal-elastischen sowie spröden Baustoffen Anwendung finden, erfolgt eine energetische Betrachtung: die gespeicherte elastische Formänderungsenergie wird in eine Oberflächenenergie zur Schaffung einer weiteren Rißfläche umgewandelt. Dieser Vorgang läßt sich am einfachsten an einer unendlich ausgedehnten Scheibe mit Zentralriß, wie in [5] dargestellt, studieren.

KAPLAN [25] versucht, die linear-elastische Bruchmechanik auf Beton anzuwenden. Als Ergebnis seiner Pionierarbeit zeigt sich, daß linear-elastische Ansätze nicht ausreichen, um das Zugtragverhalten von Beton zutreffend zu analysieren. Die Annahme eines linear-elastischen Verzerrungsfeldes in der Umgebung der Rißspitze ist aufgrund des heterogenen Betongefüges nicht erfüllt. Die plastizierende Zone des quasi-spröden Werkstoffes Beton ist in ihrer räumlichen Ausdehnung nicht vernachlässigbar. Der Energieverbrauch während des Rißfortschrittes ist lokalisiert. Nicht-lineare Betrachtungen des Baustoffes Beton sind Gegenstand von Monographien und Tagungsbänden, siehe u.a. [4, 32, 40, 44, 45]

Um einen Einblick über den Bereich der Rißprozeßzone zu gewinnen, wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Über direkte und indirekte Untersuchungsmethoden wird hier berichtet. Den Stand der Kenntnis bzgl. der Ausdehnung der RPZ wird im folgenden kurz angerissen.

Bereits 1969 können HEILMANN ET AL. [18] feststellen, daß die Verformungszunahme nach Überschreiten der Betonzugfestigkeit lediglich in der RPZ erfolgt. Die übrigen Bereiche der untersuchten Probe entlasten sich. In [17] wird die Übertragbarkeit des Ergebnisses nach HEILMANN ET AL. [18] auf gekerbten Biegebalken verdeutlicht. In Abb. 2.1.b werden Last-CMOD<sup>1</sup>-Kurven dargestellt, die mit Hilfe zweier unterschiedlich langer Dehnungsmeßstreifen (30 und 60 mm) an einem Dreipunktbiegebalken ( $560 \times 120 \times 60 \text{ mm}^3$ ,  $a_0 = 40 \text{ mm}$ ,  $d_{max} = 16 \text{ mm}$ , Abb. 2.1.a) ermittelt wurden. Bis zum Erreichen der Biegezugfestigkeit sind die beiden Last-CMOD-Kurven deckungsgleich. Nach Überschreiten der Maximallast werden für  $\varepsilon_2$  (Basislänge

<sup>1</sup>Crack Mouth Opening Displacement, Rißöffnungsverschiebung



**Abbildung 2.1:** Dehnungslokalisierung an gekerbten Biegebalken nach [17]. (a) Lage der Dehnmeßstreifen und (b) erzielten Last-CMOD-Kurven.

30 mm) deutlich größere Dehnungswerte gemessen als bei  $\varepsilon_4$  (Basislänge 60 mm). Dies deutet auf das Vorhandensein eines starken Dehnungsgradienten aufgrund der Dehnungslokalisierung in der RPZ hin.

Ein eingehendes Studium der Vorgänge und Verformungen in der RPZ gelingt mit DMS und Wegaufnehmern somit nur schwerlich, da deren Basislänge und deren Positionierung das Meßergebnis merklich beeinflussen. In den letzten Jahren wurden daher zunehmend zerstörungsfreie Meßtechniken entwickelt und eingesetzt. Diese haben den Vorteil, nicht in das Versuchsgeschehen einzugreifen, da sie meist rückwirkungsfrei sind.

MINDESS & DIAMOND [34] untersuchen Compact Tension (CT) Mörtelproben im Keilsplattversuch (Probenabmessungen:  $32 \times 24 \times 13 \text{ mm}^3$  mit einer Kerbtiefe von 13 mm). Die Beanspruchung erfolgt in der Vakuumkammer eines **Rasterelektronenmikroskops** (REM). Sie berichten über eindeutige Mikrorisse, die Existenz einer RPZ können sie jedoch nicht nachweisen. TAIT ET AL. [42] belasten ebenso mit einer Belastungseinheit innerhalb der Vakuumkammer eines REM um Rißverläufe beobachten zu können. Diese Meßtechnik erweist sich als brauchbar zur Beobachtung und Klassifizierung eines Risses, allerdings nicht zur Vermessung der RPZ bzw. zur Spannungsermittlung. Auch ist das Beobachtungsfeld klein. Bei der Replikatechnik ist das Beobachtungsfeld zwar klein, man hat es jedoch mit dem rückwirkungsfreien Abdruck eines Versuches zu tun. TURATSINZE [43] berichtet über Dreipunktbiegeversuche an gekerbten Mörtelproben ( $420 \times 80 \times 50 \text{ mm}^3$ ,  $a_0 = 40 \text{ mm}$ ) mit einem Größtkorn von 2.5 mm. Er berichtet über Mikrorisse in der näheren Umgebung der Rißspitze. Diese bilden jedoch keine definierte RPZ.

Wird ein Material im nicht-elastischen Bereich beansprucht, so wandelt sich die bei der Entstehung von Mikrorissen freigewordene Energie in Schallwellen um. Die akustischen Signale sind ein Maß für die im Versuchskörper ablaufenden Bruchvorgänge. Es besteht die Möglichkeit, mit Hilfe mehrerer Empfänger und dem Triangulationsverfahren die einzelnen Schallquellen zu orten. In neueren Arbeiten an der Northwestern University [27, 30] wird neben der Amplitude auch die Wellenform des Körperschalls ausgewertet. Diese Technik erlaubt es, die Richtung des Rißfortschritts zu erfassen. LANDIS & SHAH [26, 27] erbringen mit der **Schallemissionsanalyse** den Nachweis für die Bildung einer Rißprozeßzone, sie machen jedoch keine Angaben über deren Ausdehnung, obwohl das angewandte Verfahren solche Rückschlüsse zu erlauben scheint.

SWARTZ & REFAI erproben in [41] die **Imprägniermethode** an gekerbten Dreipunktbiegebalken. Ein Reservoir wird aus zwei Alubleche gebildet und über das gekerbte Ligament mittels Silikon aufgebracht. Im Versuch von SWARTZ & REFAI handelt es sich um ein leuchtend blaues Fluid.

Kontrolliertes Eindringen der Flüssigkeit durch geregelte Rißbildung (über das CMOD) erlaubt das Verfolgen der Schädigungsfront. TURATSINZE [43] ermittelt Eindringprofile, die Aufschluß über die Ausbildung eines gerissenen Bereiches geben, der beispielsweise mit den Ergebnissen von Schallemissionsanalysen verglichen werden kann [41]. Diese Technik ist zur Erfassung der Ausdehnung der Rißprozeßzone jedoch nicht ausreichend sensitiv.

Mit der **Nachgiebigkeitsmethode** soll die Ausdehnung der RPZ durch den Vergleich der Nachgiebigkeit einer gekerbten Probe — in der keine Rißüberbrückung stattfand — mit der Nachgiebigkeit einer bereits gerissenen Probe — in der sich die RPZ entwickelt konnte — erfaßt werden können. HU [19] untersucht eine Mörtelprobe mit den Abmessungen  $200 \times 197 \times 15 \text{ mm}^2$  und einem Verhältnis  $a/W$  von 0.4, die im Keilspaltversuch beansprucht wird. Die Länge der RPZ wird dort zu 34 mm ermittelt. Aus Be- und Entlastungsversuchen kann HU die Länge der RPZ aus den gemessenen Nachgiebigkeiten prognostizieren.

Wie bereits oben dargestellt gelingt die Erfassung der Verformungen innerhalb der RPZ mit konventionellen Meßmethoden nicht zwingend. Die Schallemissionsanalyse und die Imprägniermethode erlauben zwar die Ortung von Verformungsepizentren und von Rißereignissen; eine eingehende Bestimmung der Verformungsinformation gelingt jedoch nicht. Das Verschiebungsfeld innerhalb eines definierten bzw. zu definierenden Bereich erhält man mittels **optischen Ganzfeldmethoden**. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird auf die Anwendung der **Moiré-Technik**, der **holographischen Interferometrie**, der **Speckle-Photographie** sowie des **ESPI-Verfahrens** (Elektronic Speckle Pattern Interferometry, zu deutsch: Elektronische Speckle Muster Interferometrie) bei der Erfassung bruchmechanischer Prozesse von Beton eingegangen.

DU ET AL. [8, 9] weisen auf die Möglichkeit hin, die RPZ mittels **Moiré-Interferometrie** zu identifizieren. Eine quantitative Aussage zu deren Ausdehnung erfolgt dort nicht. Es wird lediglich dem Postulat von BAŽANT & OH [2] widersprochen, daß die Ausdehnung der RPZ das dreifache des Größtkorns beträgt. Der Nachweis anhand der erzielten Meßergebnissen fehlt bzw. die Aussagen sind nicht nachvollziehbar. RAISS ET AL. [35] ermitteln anhand von Moiré-Untersuchungen Dehnungsverteilungen im einaxialen Zugversuch an ungekerbten Schulterproben ( $250 \times 60 \text{ mm}^2$ ). Das Größtkorn beträgt 10 mm. Aus den erzielten Verschiebungsfelder werden Dehnungsisolinien gezeichnet, aus denen die räumliche Ausdehnung der RPZ zu  $1 \times d_{max}$  ermittelt wird. Ab einer Peaklast von  $0.73 \cdot f_{ct}$  entwickeln sich Mikrorisse. Desweiteren berichten die Autoren über die Entwicklung mehrerer Rißprozeßzonen, wobei sich in den meisten Fällen der Bruch in einer RPZ entwickelt.

In den letzten vierzig Jahren wurden unmittelbar nach der Einführung des Lasers Anstrengungen unternommen, Interferenzerscheinungen, die sich durch die Überlagerung von zwei kohärenten Laserstrahlen ergeben, auf einer Photoemulsion zu konservieren. Hierzu eignen sich Holographiefilme, da diese die Möglichkeit der Amplitudenspeicherung als auch der Abspeicherung der Phasenlage bieten. Das Grundprinzip der **holographischen Interferometrie** besteht darin, zwei Zustände zu erfassen und auf eine photoemulsive holographische Schicht zu superponieren. Diese Techniken sind nur mit einem sehr empfindlichen und komplizierten Aufbau zu realisieren. Nach JACQUOT & RASTOGI [21] bilden sie jedoch die sensitivsten Techniken zur Ermittlung der Prozeßzonenausdehnung. Mit Hilfe der Interferometrie lassen sich auf der Oberfläche des zu prüfenden Körpers auftretende Verschiebungsfelder aufnehmen. Die Empfindlichkeit eines solchen Systems liegt erfahrungsgemäß unabhängig von der Oberflächenrauigkeit in der Größenordnung von  $0.5 \mu\text{m}$  in-plane.

Verschiedene Autoren [7, 23, 31, 33, 36, 39] berichten über **holographische Verschiebungsmessungen** an mineralischen Baustoffen. Die Experimente erfolgen ausschließlich auf der optischen Bank, d.h. der optische Aufbau und die Beanspruchungseinrichtung sind auf einem schwingungsgedämpften Tisch plziert. Die Größe der untersuchten Proben ist dementspre-

chend. MAJI & WANG [31] berichten über Versuche an CT-Proben ( $152.4 \times 152.4 \times 25.4 \text{ mm}^3$ , Kerbtiefe 51 mm) aus Indiana-Kalkstein. Dehnungskonzentrationen werden durch Krümmung der Korrelationsstreifen im ansteigenden Ast der Spannung-Dehnungslinie gedeutet. MILLER ET AL. [33] führen Versuche an einer Mörtelplatte ( $3 \text{ mm}$  Größtkorn) mit den Abmessungen  $305 \times 305 \times 25 \text{ mm}^3$  durch, in der ein mittiges Loch  $\varnothing 25 \text{ mm}$  erzeugt wird. Die Öffnung wird beidseitig mit einer Kerbe  $a_0 = 10 \text{ mm}$  versehen. Die Beanspruchung erfolgt durch Aufweiten der künstlichen Öffnung. Mittels holographischer Interferometrie ermitteln die Autoren Verschiebungsprofile. Vergleichbare Verschiebungsprofile werden in [39] dargestellt. SHAH [39] beobachtet bei zunehmender Belastung eine Zunahme der Rißöffnung ohne einen nennenswerten Rißfortschritt und sieht darin eine Bestätigung des Konzepts des kritischen CTOD im Zweiparametermodell [22]. CASTRO-MONTERO ET AL. [6] werten exemplarisch Dehnungsverteilungen an der eben genannten Mörtelplatte aus und vergleichen diese mit den Ergebnissen aus linear-elastischen Berechnungen. Die Differenz der beiden Verteilungen deutet auf die Ausdehnung der RPZ. Die Autoren definieren signifikante Werte ab einer Dehnungsdifferenz von  $6 \cdot 10^{-4}$ . Quantitative Auswertungen von CEDOLIN ET AL. [7] an ungekerbten Schulterproben ( $200 \times 40 \times 70/40 \text{ mm}^3$ ) entlang von definierten Auswertungslinien zeigen den Fortschritt der Mikrorißentwicklung. Es entstehen Unstetigkeitsstellen, die von kontinuierlichen Dehnungsverläufen umschlossen sind. Dehnungsgradienten werden hier sichtbar, die auf Dehnungslokalisierung hindeuten. REGNAULT & BRÜHWILER [36] nutzen die bildgebende **holographische Interferometrie** zur Erfassung der RPZ von Mörtelproben ( $d_{max} = 3 \text{ mm}$ ) und von Betonkörpern ( $d_{max} = 8 \text{ mm}$ ) im Keilspaltversuch. Auch hier erfolgt die Belastung der  $200 \times 195 \times 35 \text{ mm}^3$  großen Proben in einem Prüfraahmen auf dem optischen Tisch. Die RPZ wird als ovales Gebilde aus Verläufen von Dehnungsisolinien ermittelt. Hierzu definieren REGNAULT & BRÜHWILER eine Schwelldehnung von  $10^{-4}$ , die die räumliche Abgrenzung der RPZ bildet. Sie berichten qualitativ über eine ausgeprägtere RPZ im Fall der Betonproben als beim Mörtel.

Es ist jedoch zu bemängeln, daß die holographische Interferometrie sowie die zuvor vorgestellte Moiré-Technik das on-line monitoring von Verschiebungsfeldern nicht gestattet, so daß die zweite Belichtung, die zu einem Streifenmuster führt, willkürlich durchzuführen ist. Zudem besteht keine Möglichkeit, die Richtung der fortlaufend entstandenen Streifen zu ermitteln.

ANSARI [1] bedient sich der **Speckle-Photographie** zur Untersuchung des Zugbruchverhaltens von beidseitig gekerbten Schulterproben ( $57/44.4 \times 305 \times 25.4 \text{ mm}^3$ , Kerbtiefe 9.5 mm). Das Größtkorn beträgt dort 9.5 mm. Er beobachtet Mikrorisse in einem Band mit einer Breite von 6 mm ab ca.  $0.7 \cdot f_{ct}$ . Nach ANSARI beeinflusst die Kerbe nicht die Entstehung von Mikrorissen. Die stärkste Mikrorißbildung beobachtet er an Orten, die deutlich von den Kerben entfernt sind. Demnach wäre der Werkstoff Beton kerbunempfindlich. Der Bruch wird mit einer kritischen Rißöffnung von  $24 \mu\text{m}$  in Verbindung gebracht, anschließend entfestigt sich die Probe. Die kritische Rißöffnung erscheint unabhängig vom absoluten Wert der Festigkeit zu sein. An dieser Stelle ist die Empfindlichkeit des Aufbaus zu berücksichtigen, denn ein empfindlicherer Aufbau würde u.U. Mikrorisse mit geringerer Rißbreite bereits erkennen. ANSARI [1] berichtet über ähnliche Größenordnungen der kritischen Rißbreite für Beton- und für Mörtelproben. Er schließt hieraus, daß der Betonzugbruch seinen Ursprung im Versagen der Zementsteinmatrix findet. ROSTÁSY & LAUBE [38] wenden die Laser-Speckle Photographie zum Studium des Rißfortschritts bzw. der Entwicklung der RPZ von Kerbzugkörpern ( $80 \times 160 \times 360 \text{ mm}^3$ , Kerbtiefe 20 mm). Das Zuschlaggrößtkorn beträgt dort 16 mm. Sie stellen eine Dehnungskonzentration im Nachbruchbereich fest, die zunächst von einer Kerbe ausgehend um den späteren Rißquerschnitt stattfindet. Nach Aussage der Autoren beträgt die Länge der RPZ zumindest das dreibis vierfache des Größtkorns. Da die Frequenz der Auswertungspunkte offensichtlich verhältnismäßig grob ist ( $7 \times 10$  Auswertungspunkte der Youngschen Streifen auf einem Meßfeld von  $50 \times 100 \text{ mm}^2$ ), ist eine quantitative Deutung der räumlichen Ausdehnung der RPZ erschwert.

Bei den vorgestellten Ganzfeldmeßverfahren auf optischer Basis deutete sich ein erheblicher



Nachteil der Meßmethodik an. Die Doppelbelichtung einer photoemulsiven Schicht erfordert eine naßchemische Entwicklung und eine zusätzliche aufwendige Bearbeitung. Dieser Mangel wird bei dem Verfahren der **elektronischen Speckle Muster Interferometrie** (kurz **ESPI**, auch in einigen Veröffentlichungen TV-Holographie genannt) behoben. Bei diesem Verfahren werden Interferenzerscheinungen auf einem elektronischen Medium zwischengespeichert. Die Doppelbelichtung erfolgt durch eine phasenrichtige Subtraktion der elektronisch gespeicherten Aufnahmen. Neben der Detektion von sehr feinen Rissen kann auch — anders als bei der Speckle-Photographie beispielsweise — die Richtung von Gradienten eindeutig bestimmt werden. Es ist somit möglich, ein Doppelbelichtungshologramm im Video-Takt zu erhalten. Diese Meßtechnik wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit angewandt, weshalb auf ihre Arbeitsweise im Abschnitt 3 gesondert eingegangen wird.

ROSTÁSY & LAUBE [38] verwenden einen Meßkopf, in dem eine out-of-plane sensitive Optik aufgebaut ist, der — im Gegensatz zu den bisherig vorgestellten optischen Aufbauten — an die Universalprüfmaschine gekoppelt werden kann, so daß sich hierdurch keine Einschränkungen bezüglich der Prüfung ergeben. Die Rißbildung von Kerbzugkörpern (siehe oben) wird verfolgt, Verschiebungsepizentren werden detektiert. Ein ähnliches Ziel verfolgen MAJI & WANG in [31] und HANSEN in [15]. Mit Hilfe eines speckle-interferometrischen Aufbaus auf einem schwingungsgedämpften Tisch beobachten MAJI & WANG den Rißfortschritt an den CT-Proben aus Kalkstein, bei denen bereits die holographische Interferometrie eingesetzt wurde (siehe oben). HANSEN verfolgt die Rißbildung an gekerbten Betonbalken ( $100 \times 600 \times 1200 \text{ mm}^3$ , Kerbtiefe 50 mm). Aufgrund der Erscheinung der Speckles (Rauschen) verliert ein Speckle-Aufbau an örtlicher Auflösung. Desweiteren ist im Gegensatz zu anderen optischen Verfahren wie beispielsweise dem Moiré-Verfahren, eine Ortsauflösung im Sub-Pixelbereich nicht möglich. Ein vergleichbarer Aufbau, der jedoch sowohl in der Objektebene als auch out-of-plane sensitiv und in kompakter Bauform konzipiert ist, wird von HACK ET AL. [14] verwendet. Gekerbte Keilspaltproben ( $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$ , Kerbtiefe 104 mm) aus Polymerbeton werden beansprucht. Die RPZ wird als den Bereich identifiziert, in dem die Korrelationsstreifen gebrochen werden. Die Autoren schlagen den Einsatz eines zuverlässigeren Kriteriums zur Erfassung der räumlichen Ausdehnung der RPZ mittels Auswertung von Dehnungsverteilungen vor. Die Dehnungsverteilungen werden, wie in [16] bereits vorgeschlagen, durch numerische Differentiation in Form eines Pixel-Shifts ermittelt. Dort wird die räumliche Ausdehnung der RPZ aus Verformungsverteilungen als der Bereich der größten Streifenkrümmung im Nachbruchbereich von gekerten Biegebalken ( $560 \times 120 \times 60 \text{ mm}^3$ , Kerbtiefe 40 mm) gedeutet. Der Vorgang der Dehnungsermittlung mittels Pixel-Verschiebung findet im nächsten Abschnitt nähere Erläuterungen.

### 3 Programm, Prüf- und Meßtechnik der eigenen Versuche

Die Versuche wurden an Kerbzugkörpern und an gekerbten Biegebalken durchgeführt. Es handelt sich in beiden Fällen um Mode I-Rißöffnungen. Die Versuchskörper wurden gewählt, um den Einfluß der "Versuchsart" erfassen zu können und um ggf. Fehlern durch Starrkörperbewegung entgegenzuwirken. Zusätzlich muß hier erwähnt werden, daß Kerbzugkörper u.a. auch deshalb ausgewählt wurden, um an den bisher am iMBB der TU Braunschweig durchgeführten Untersuchungen von LAUBE [29] und GUTSCH [13] anschließen zu können. Die Biegebalken werden nach den RILEM-Empfehlungen gefertigt und geprüft, um einen Anschluß an die in der Literatur aufgeführten Ergebnisse zu finden.

#### • Einfluß des Erhärtungszustands

Versuche anderer Autoren — s. z.B. [5] — haben gezeigt, daß die Bruchenergie  $G_F$  vom wirksamen Alter bzw. vom Hydratationsgrad abhängt. Aus diesem Grund werden

die Versuche mit einer isothermischen Temperaturgeschichte ( $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ) durchgeführt (versiegelte Lagerung im regelbaren Wasserbad, Frischbetontemperatur  $20^\circ\text{C}$ ). Um eine Spreizung des Hydratationsgrades zu erreichen, wurden desweiteren die Rezepturen mit Portland- und mit Hochofenzement angemischt, siehe hierzu Tab. 3.1.

- **Einfluß der Betondruckfestigkeit**

Es sollen zwei Betonfestigkeiten untersucht werden: B35 und B75, da die Bruchenergie und das Verformungsvermögen von der Betonfestigkeit abhängen. Bei der Zusammensetzung des B75 wird wie bisher ein Zement vom Typ CEM I 32.5 R und zusätzlich Si-Staub eingesetzt, als Zuschlag wird weiterhin Normalzuschlag (Okerkies) verwendet.

- **Einfluß des Größtkorns**

Weil die Bruchenergie vom Größtkorn abhängt, wird der Einfluß eines Größtkorndurchmesser von 4, 8 und 16 mm untersucht.

- **Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit**

Bereits M. LAUBE [29] hat an zentrischen Zugversuchen gezeigt, daß die Bruchenergie sowohl vom Hydratationsgrad als auch von der Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  (gemessen über die RPZ) abhängt. Aus diesem Grund wird die Dehngeschwindigkeit in weitem Bereich variiert:  $\dot{\epsilon}_1 = 1\text{‰}\cdot\text{h}^{-1}$  (Kurzzeitversuch);  $\dot{\epsilon}_2 = 0.01\text{‰}\cdot\text{h}^{-1}$  (Langzeitversuch).

- **Einfluß der Probengröße**

Für die praktische Versuchsdurchführung zur Berücksichtigung des Maßstabeffekts unter Verwendung der bisherigen Meßdaten sind geometrisch ähnliche Probekörper mit identischer Tiefe erforderlich. Variiert werden die Höhen und die Stützweiten.

### 3.1 Versuchskörper

Zwei Probekörpertypen: Kerbzugkörper und gekerbte Biegebalken kamen im Rahmen dieser Forschungsarbeit zum Einsatz. Die Kerbzugkörper sind unbewehrte Betonprismen, die waagrecht in einer Holzschalung hergestellt wurden. Tab. 3.2 stellt die Abmessungen der Kerbzugkörper dar. Die Körper wurden nach dem Ausschalen in einem temperierten Wasserbad gelagert. Die beidseitigen Kerben wurden als 3 mm breite Sägeschnitte ausgeführt. Gleiches gilt für die Biegebalken, deren Abmessungen in Tab. 3.2 zusammengefaßt sind. Die Balken wurde senkrecht betoniert. Das Sägen der Kerben erfolgte an der unteren Betonierseite.

### 3.2 Prüfeinrichtung

Die Belastungseinrichtung ist eine elektromechanische Universalprüfmaschine des Typs ZWICK 1484 mit einer Nennlast von 500 kN. Die Versuche erfolgen dehnungskontrolliert über Wegaufnehmer. Die Stirnflächen der Kerbzugkörper werden vollflächig an den Ankerplatten der UPM verklebt, um Exzentrizitäten entgegen zu wirken. Aufgrund der vom Hersteller gewährten feinen Parallelität der Traversen und der Steuermöglichkeiten, ist eine gelenkfreie Krafteinleitung gesichert. Beim Drei-Punkt-Biegeversuch wird die Last über ein Lasteintragungsschwert aufgebracht. Der Lasteintrag erfolgte entgegen dem Eigengewicht. Dieser Versuchsaufbau wurde aus zwei Gründen gewählt. Zum einem würde das Eigengewicht der großen Balken das Versuchsergebnis erheblich verfälschen bzw. die Steuerung des Versuches — insbesondere im Nachbruchbereich — stark beeinträchtigen. Desweiteren ergibt sich bei dieser Lasteintragung eine Verbesserung der Speckle-Bildauswertung.

**Tabelle 3.1:** Zusammensetzung der verwendeten Betone (Angaben in kg/m<sup>3</sup>)

			Beton B35		
			Gk 16 mm	Gk 16 mm	Gk 8 mm
Mischungs Nr			M1	M2	M3
Zement	Teutonia	CEM I 32.5 R	270.00	270.00	400.00
Flugasche	HIB 30 S-B/E	60.00	60.00	60.00	60.00
Wasser		175.00	175.00	175.00	230.00
Sand	0/1	Abbesbüttel	185.60	185.60	138.30
Sand	0/2	Vienenburg	463.90	463.90	553.30
Kies	2/8	Blockhorst	554.60	554.60	691.70
Kies	8/16	Vienenburg	644.60	644.60	0.00
Verflüssiger (BV)	BV25 Woermann	2.70	2.70	2.70	4.20
			Beton B35		Beton B75
			Gk 4 mm	Gk 4 mm	Gk 16 mm
Mischungs Nr			M4	M5	M6
Zement	Teutonia	CEM I 32.5 R	276.00	276.00	460.00
Flugasche	HIB 30 S-B/E	60.00	60.00	60.00	0.00
Wasser		163.00	163.00	163.00	135.00
Sand	0/1	Abbesbüttel	756.60	756.60	0.00
Sand	0/2	Vienenburg	134.50	134.50	745.00
Kies	2/4	Hameln	790.30	790.30	0.00
Kies	2/8	Blockhorst	0.00	0.00	205.00
Kies	8/16	Vienenburg	0.00	0.00	945.00
Verflüssiger (BV)	BV25 Woermann	2.76	2.76	2.76	0.00
Fließmittel (FM)	FM 26 Addiment	0.00	0.00	0.00	14.00
Gefällte Kieselsäure	BAGRAT KS 300	0.00	0.00	0.00	14.00
			Beton B75		Stahlfaserbeton
			Gk 16 mm	Gk 16 mm	Gk 16 mm
Mischungs Nr			M7	SFB1	SFB2
Zement	Teutonia	CEM III/A 32.5	460.00	385.00	385.00
Wasser		135.00	135.00	145.50	145.50
Sand	0/2	Vienenburg	745.00	690.00	690.00
Kies	2/8	Blockhorst	205.00	530.00	530.00
Kies	8/16	Vienenburg	945.00	643.33	643.33
Verflüssiger (BV)	BV25 Woermann	0.00	0.00	1.15	1.15
Fließmittel (FM)	FM 26 Addiment	14.00	14.00	0.00	0.00
Gefällte Kieselsäure	BAGRAT KS 300	14.00	14.00	0.00	0.00
Stahlfasern	DRAMIX	0.00	0.00	40.00	40.00

Tabelle 3.2: Abmessungen der untersuchten Probekörper

Kerbzugkörper					gekerbte Biegebalken				
Größe	B	H	T	a <sub>0</sub>	Größe	B	W	S	a <sub>0</sub>
KG 1	80 mm	180 mm	80 mm	10 mm	BG 1	60 mm	60 mm	240 mm	20 mm
KG 2	120 mm	270 mm	80 mm	15 mm	BG 2	60 mm	80 mm	320 mm	30 mm
KG 3	160 mm	360 mm	80 mm	20 mm	BG 3	60 mm	120 mm	480 mm	40 mm
KG 4	240 mm	540 mm	80 mm	30 mm	BG 4	60 mm	180 mm	720 mm	60 mm

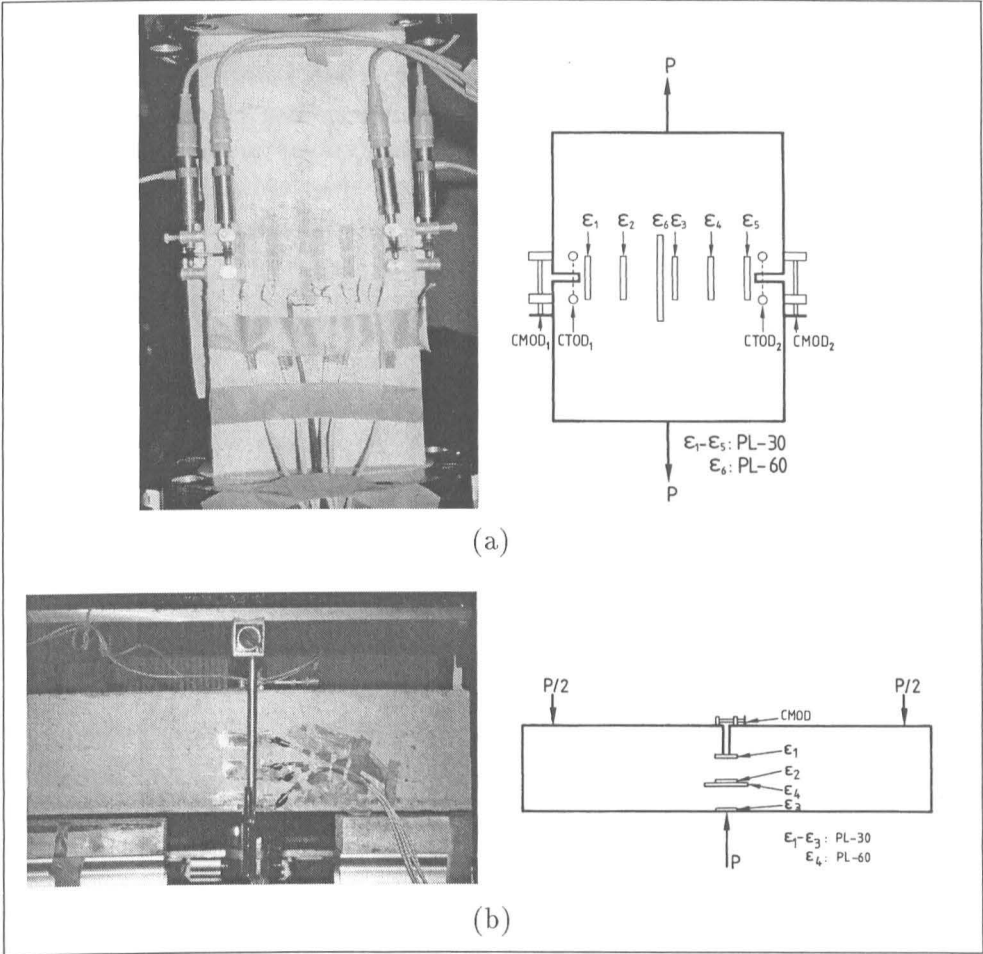


Abbildung 3.1: Instrumentierung der Probekörper: (a) Anordnung der Meßtechnik am Kerbzugkörper. An den Kerben sind zur Regelung und zur CMOD-Messung induktive Wegaufnehmer angebracht. An den Seiten befindet sich je ein Wegaufnehmer, der zur Messung der Zugexzentrizität dient. (b) Anordnung der Meßtechnik am Biegebalken. Der zur Messung der Durchbiegung erforderliche Wegaufnehmer ist auf dem oberen Bild zu sehen: die zwei Aufnehmer zur Messung der Rißöffnung und die vier angeordneten DMS am CTOD, in der neutralen Faser (bei Versuchsbeginn) sowie am Zuggurt.

### 3.3 Versuchsdurchführung und -steuerung

Die Versuchsteuerung und -regelung des Korbzugversuches sowie des Dreipunktbiegeversuchs erfolgt über zwei, an der Kerbe angebrachte induktive Wegaufnehmer (CMOD) – siehe Abb. 3.1. Die Last wird über eine Kraftmeßdose registriert.

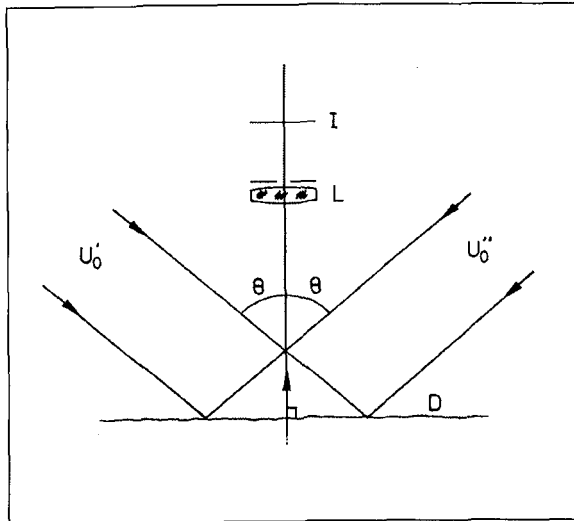
### 3.4 Speckle Interferometrie

Das Hauptaugenmerk der Erfassung von Dehnungsverteilungen liegt im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeit in der optischen Laser-Speckle-Interferometrie. Aus diesem Grund wird auf diese zerstörungsfreie, berührungslose und vor allem rückwirkungsfreie Meßtechnik hier gesondert eingegangen. Zum besseren Verständnis des Meßverfahrens werden zunächst die Grundlagen der Speckle-Interferometrie erläutert. Anschließend werden Versuchsaufbau und Vorgehensweise vorgestellt.

#### Auftreten von Speckleerscheinungen

Aufgrund des Wellencharakters des Lichtes können Interferenzerscheinungen auftreten, wenn mehrere Wellen aufeinander treffen. Beleuchtet man eine im Vergleich zur Wellenlänge rauhe Oberfläche mit sogenanntem kohärentem Licht, so erscheint diese Oberfläche dem Betrachter nicht gleichmäßig beleuchtet, sondern sie zeigt ein körniges Aussehen. Diese sogenannten "Speckles" entstehen durch die Bildung mikroskopischer Streuzentren.

#### In-Plane-Interferometrie

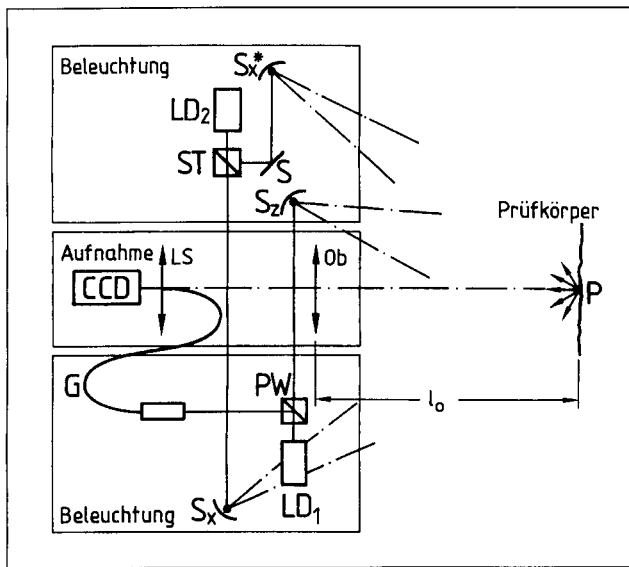


**Abbildung 3.2:** Strahlengang der In-Plane-Interferometrie

beiden Lichtbündeln ist jeweils ein Specklefeld zuzuordnen.

Ein Specklemuster wird zu einer meßtechnisch auswertbaren Größe, wenn es aus der Interferenz eines Objekt- und eines Referenzstrahls entsteht. Hierbei können zwei Specklefelder überlagert werden. Im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeit ist die laterale Empfindlichkeit eines Interferometers, d.h. die Sensitivität in der Ebene senkrecht zum Lichteinfall von Bedeutung. Man spricht von einer in-plane-Messung. Es gilt die Objektoberfläche im klassischen Aufbau des Zweistrahlinterferometers durch zwei Beleuchtungsrichtungen kohärent zu bestrahlen. Wie in Abb. 3.2 zu erkennen, wird nach JONES & WYKES [24] die Objektoberfläche durch zwei unter gleichem Winkel  $\theta$  einfallende kohärente Lichtbündel  $U'_0$  und  $U''_0$  beleuchtet. Diesen

### Optischer Aufbau



**Abbildung 3.3:** Optischer Aufbau des verwendeten Interferometers nach GALANULIS & RITTER

Der optische Aufbau ist entsprechend Abb. 3.3 in Form eines aus Beleuchtungs- und Abbildungsoptik bestehenden kompakten Meßkopfes konzipiert. Zwei Komponenten der Beleuchtungsoptik dienen den in-plane Richtungen  $x$  und  $y$ . Die dritte Komponente dient der Beleuchtung in der hier nicht weiter verwendeten out-of-plane  $z$ -Richtung.

Um die Objektverschiebungen in der  $x$ -sensitiven Richtung zu erfassen, wird die Objektoberfläche durch das Licht der Laserdiode  $LD_2$  durch den Strahlenteiler  $ST$  und die zwei aufweitenden Kugelspiegel  $S_x$  und  $S_x^*$  beleuchtet. Die Beleuchtungsebene der  $y$ -sensitiven Beleuchtungsrichtung ist um  $90^\circ$  um die Beleuchtungsachse verdreht [11].

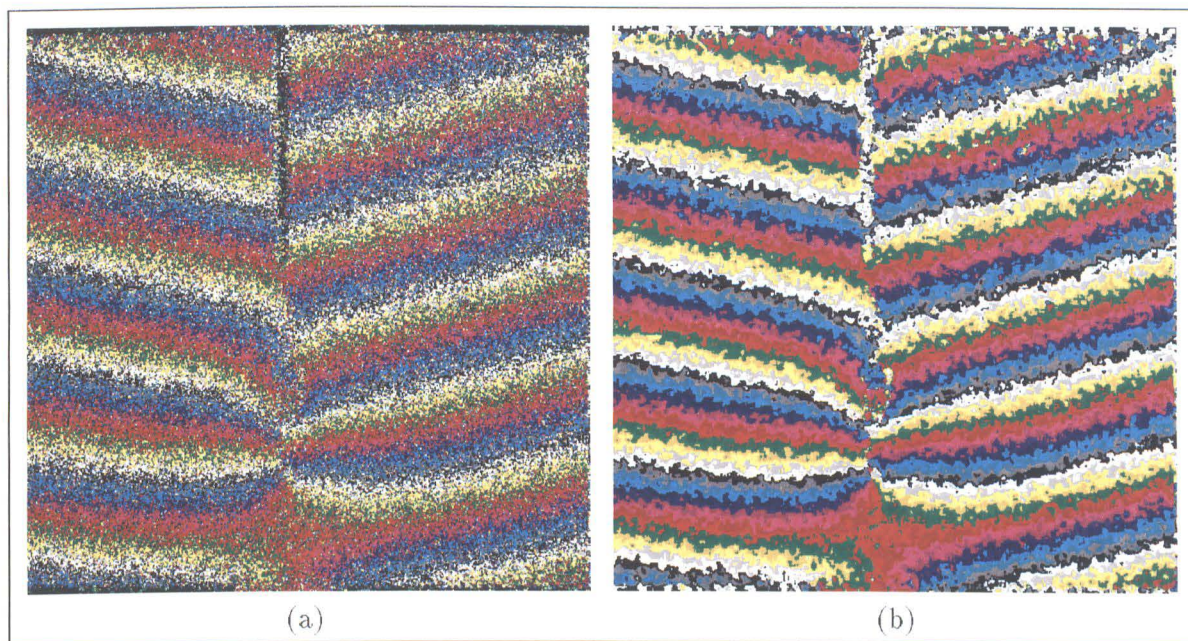
### Verformungsmessungen mittels Speckle-Interferometrie

Zur Verformungsmessung mit der Speckle-Interferometrie sind zwei Belastungsbilder erforderlich. Die Subtraktion dieser beiden Bilder stellt eine Superposition von zwei Zuständen dar. Es handelt sich hier um eine phasenrichtige Überlagerung zweier Zustände, bei denen sich die optischen Wege derart verändert haben, daß es zu Interferenzen kommt. Das aufgrund des Speckle-Effekts verrauschte Streifenbild ist so zu glätten, daß eine Entfaltung des Streifenbildes durchgeführt werden kann. Das entfaltete Bild stellt eine Verschiebungsverteilung entlang der Sensitivitätsrichtung dar. Exemplarisch werden in Abb. 3.4 die Schritte der Bildsubtraktion und der Filterung am Beispiel eines Biegebalkens mit einer Sensitivität in der  $X$ -Richtung von  $2.56 \mu\text{m}$  pro Korrelationsstreifen dargestellt. Das aufgenommene Meßfeld stellt eine Rechteckfläche der Größe  $100 \times 90 \text{ mm}^2$  dar. Die Verformungsbilder entstammen einer CMOD-Öffnung von  $24 \mu\text{m}$  nach Erreichen der Bruchlast. Abb. 3.4a zeigt das Verformungsverhalten des Biegebalkens in Form von Korrelationsstreifen. Die dargestellten Korrelationsstreifen kennzeichnen Orte gleicher Verschiebung. Nach der Filterung des Korrelationsstreifenbildes werden die in Abb. 3.4b dargestellten Streifen schärfer. Aufgrund der phasenrichtigen Aufnahme der Korrelationsstreifen kann die Richtung der Streifen mittels eines Graustufenbildes charakterisiert werden, das eine quantitative Analyse des Verformungsfeldes darstellt. Der Prozeßrechner, d.h. der Entfaltungsalgorithmus ist in der Lage zu erkennen, daß zwei diesseits und jenseits der Unstetigkeit nebeneinanderliegende Korrelationsstreifen nicht derselben Ordnung angehören.

### Streifenaddition

Verschiebt sich die gesamte zu untersuchende Probe in der Sensitivitätsebene, so entstehen Verschiebungsstreifen. Diese haben jedoch keine Relevanz, da ihnen keine Verformungen zugrunde liegen. Starrkörperverschiebungen in der Sensitivitätsebene führen zu einem Streifenbild, das dem Verformungsbild überlagert wird. Führt man im Fall einer Dehnungsmessung — wie sie im nächsten Abschnitt erläutert wird — eine Differentiation entlang des Sensitivitätsvektors durch, so verschwinden die Fehlstreifen. Ein hohes Streifenaufkommen, wie es bei Dreipunktbiegeversuchen auftritt, führt zu einem starken Kontrastverlust. Der Grund hierfür ist das





**Abbildung 3.4:** Auswertung der gewonnenen Speckle-Bilder: (a) ungefiltertes und (b) gefiltertes Korrelationsstreifenbild am Beispiel eines gekerbten Biegebalkens (gesägte Kerbe in den oberen Bildteilen)

überlagerte Specklerauschen. Mittels Zwischenbildern lassen sich Streifenbilder erzeugen, die phasenrichtig addiert werden können. Vor der phasenrichtigen Addition ist eine leicht glättende Filterung vorzunehmen, die die Streifenbilder vom Specklerauschen befreit und so einer Dekorrelation entgegen wirkt.

### Dehnungsberechnung

Aufgrund des o.g. hohen Aufkommens an Starrkörperbewegungsstreifen, wurde es erforderlich eine Möglichkeit zu finden, Dehnungsfelder zu erzeugen. Eine simple Differentiation des gefilterten Streifenbildes durch ein Shifting entlang des Sensitivitätsvektors, wie es im Bereich der Metallforschung möglich ist, brachte z.T. nur wenig zufriedenstellende Ergebnisse. Dieses Verfahren zeigt annehmbare qualitative Ergebnisse unter der Voraussetzung, daß das Bild wenig Streifen beinhaltet und, daß — entscheidend in diesem Zusammenhang — keine Unstetigkeitsstellen vorhanden sind. Aus den o.g. Gründen ist man einen anderen Weg zur Bestimmung von Dehnungsfeldern gegangen. Entfaltete Bilder werden systematisch differenziert, d.h. die Steigung der Grauwerte wird bestimmt.

### Auswertung

Im Rahmen der hier vorliegenden Forschungsarbeit mußte die vorhandene käufliche Bildverarbeitungssoftware ergänzt werden. Es handelt sich um ein System, das für konventionelle Bilderfassung und -verarbeitung konzipiert wurde. Zur Auswertung der Messungen wurde eine Eigenentwicklung als Erweiterung des Basispakets implementiert. Hierauf wird nicht weiter eingegangen, da Details den Rahmen dieser Forschungsarbeit sprengen würden. Desweiteren wurde eine Demodulationsfunktion, das Werkzeug der Entfaltung der  $2\pi$ -Modulation, eingeführt. Sie ist in der Lage Inkonsistenzstellen zu erkennen, die beispielsweise durch rißbedingte Unstetigkeiten entstehen.

## 4 Versuchsergebnisse

### 4.1 Überblick

Im folgenden werden Versuchsergebnisse dargestellt, die sowohl an Kerbzugkörpern als auch an gekerbten Biegebalken erzielt wurden. Diese dienen der Veranschaulichung der Ergebniserzeugung mittels ESPI-Technik. Anschließend erfolgt eine Darstellung der Einflüsse einzelner Versuchsparameter auf die räumliche Ausdehnung der Rißprozeßzone. Der Schwerpunkt der hier vorgestellten Ergebnisse liegt in der optischen Auswertung. Vereinzelt werden auch Meßergebnisse dargestellt, die mit konventioneller Meßtechnik erzielt wurden.

### 4.2 Ergebnisbeispiele von Kerbzugversuchen

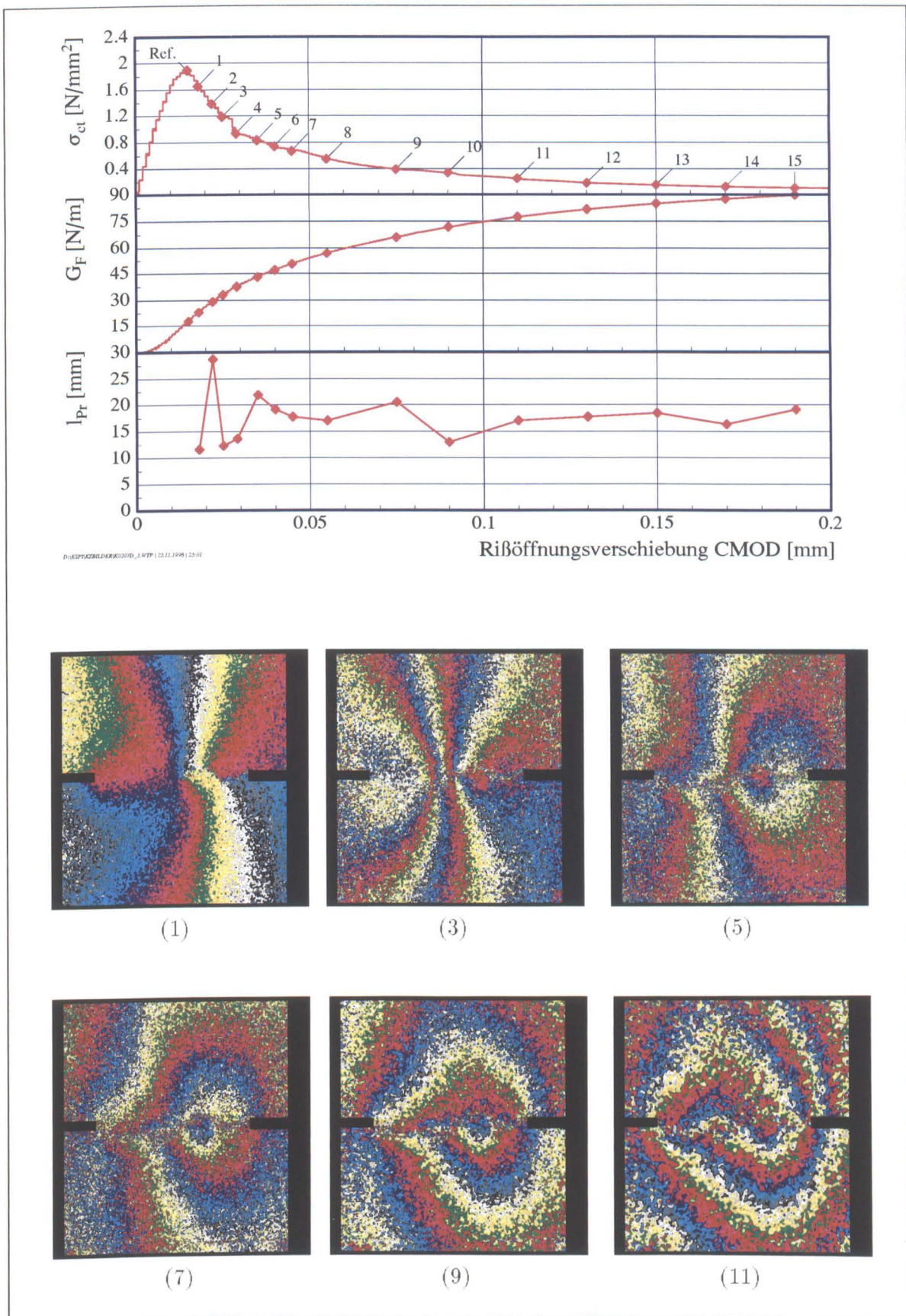
Im Rahmen des hier vorliegenden Berichtes wird zunächst exemplarisch auf die Entwicklung des Bruchprozesses am Beispiel des Kerbzugkörpers K0207D\_3 eingegangen. Es handelt sich um einen Probekörper der Größe KG 3 ( $160 \times 360 \times 80 \text{ mm}^3$  mit einer Kerbtiefe von 20 mm) der Mischung M6 (B 75) mit einem Größtkorndurchmesser von 16 mm. Abb. 4.1 zeigt laststufenweise die Entwicklung der Zugspannung  $\sigma_{ct}$ , der Bruchenergie  $G_F$  sowie der Breite der RPZ  $l_{pr}$  in Abhängigkeit von der Rißöffnungsverschiebung CMOD sowie einige, den Laststufen zugehörigen Korrelationsstreifenbilder, die die Rißentwicklung dokumentieren. Die Korrelationsstreifenbilder beziehen sich auf den Bruch, d.h. die Entwicklung der RPZ wurde im Nachbruchbereich ermittelt. Die Korrelationsstreifenbilder zeigen eindeutig den Anriß ausgehend von der rechten Seite. Der Riß breitet sich stetig bis zum kompletten Durchriß aus. Die Rißentwicklung korreliert in etwa mit dem Verlauf der bruchenergetischen Rate. Bis zur Laststufe 4 fällt die Spannung stark ab, die Breite der RPZ streut ebenso stark. An dieser Stelle erfolgt der Durchriß an der Probenoberfläche in Form einer über das Ligament durchgehenden Unstetigkeit. Ab dieser Laststufe verläuft  $l_{pr}$  stetig. Die Bruchenergie findet einen Wendepunkt. Die maximale Breite der RPZ beträgt 28.67 mm.

Abb. 4.2 stellt einige Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlicher Betonzusammensetzungen bei einem Alter von 28d dar. Das Studium der Meßergebnisse läßt folgendes Fazit zu: Mit steigender Rißöffnung und somit auch mit zunehmender Rißlänge nimmt die Breite der RPZ ab. Dies ist damit zu begründen, daß die Energiedissipation mit steigender Rißlänge sinkt. Konsequenterweise wird die räumliche Ausdehnung der RPZ kleiner, da sie als Bereich der größten Energieumsetzung angesehen werden kann. Desweiteren kann festgestellt werden, daß sich bei nahezu allen Versuchen ein Maximum ausbildet. Ein solcher Verlauf wurde bereits von BRAMESHUBER [5] beschrieben, wobei dort das Maximum der RPZ-Breite beim Erreichen der Maximallast vorzufinden ist. Die Ausbildung eines Maximums ist bei den Versuchen an gekerbten Biegebalken ausgeprägter (siehe nächsten Abschnitt). Auch ist die Streubreite groß. Die Meßergebnisse widersprechen trotz der Streuung insbesondere bei den Versuchen mit Betonen kleiner Körnung (bis 8 mm) dem Postulat von BAŽANT & OH [2], wonach  $l_{pr}$  etwa das zwei bis dreifache des Größtkorns beträgt.

### 4.3 Ergebnisbeispiele von Versuchen an gekerbten Biegebalken

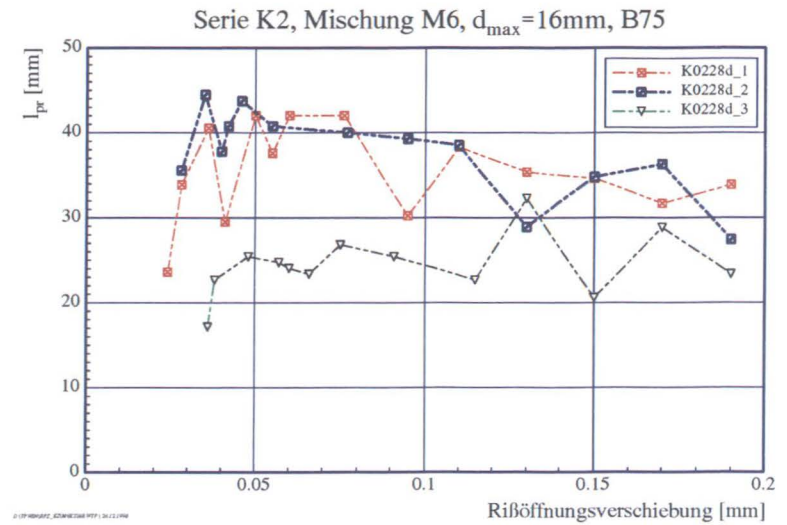
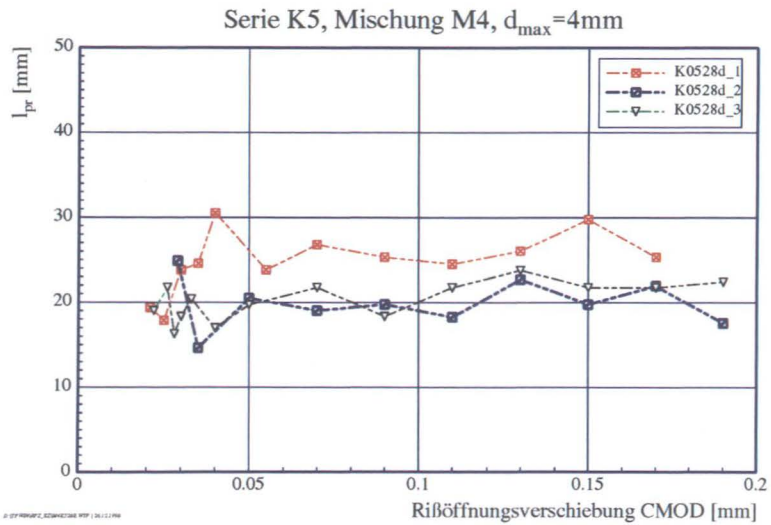
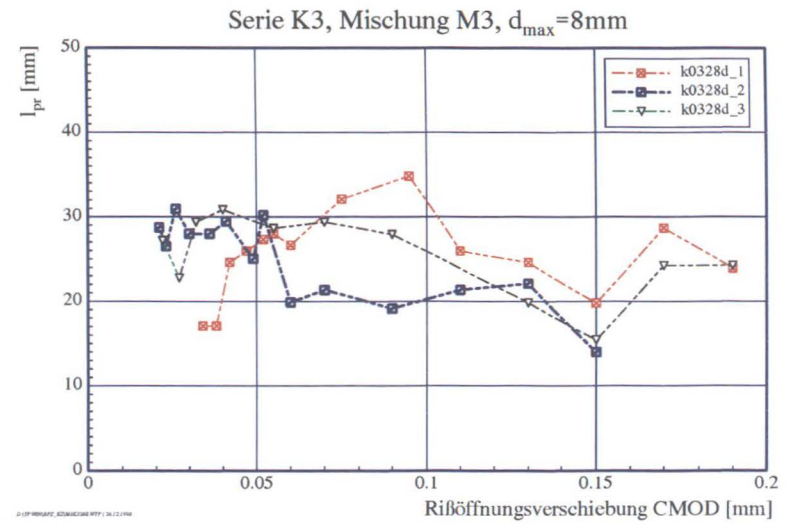
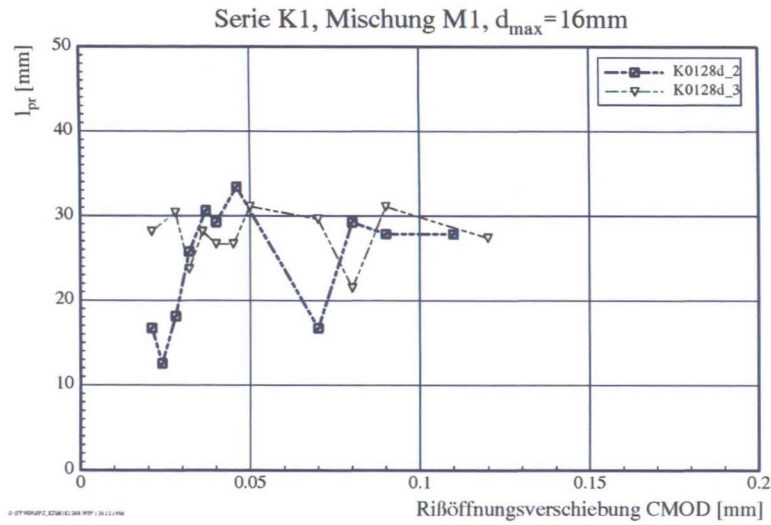
Auch hier werden zunächst Ergebnisbilder vorgestellt, die die Entwicklung des Rißprozesses am Beispiel des Balkens P3928D\_1 veranschaulichen. Die Zusammensetzung dieses Balkens





**Abbildung 4.1:** Exemplarischer Verlauf der Spannung, der Bruchenergie sowie der Breite der Rißprozeßzone in Abhängigkeit von der Rißöffnungsverschiebung (oben) und den Laststufen zugehörigen Korrelationsstreifen in vertikaler Sensitivität am Beispiel der Probe K0207D.3 (B75,  $d_{max} = 16$  mm, Probengröße KG 3).

**Abbildung 4.2:** Entwicklung der Breite der Ribprobenzone an Kerbzugkörpern exemplarischer Mischungen bei 28 d



entspricht wie oben der Mischung M6<sup>2</sup> mit einem Größtkorn von 16 mm. Es handelt sich hier um einen Biegebalken der Größe BG 3 ( $60 \times 120 \times 560 \text{ mm}^3$  mit einer Kerbtiefe von 40 mm). Im Gegensatz zum Kerbzugversuch hat man es hier mit einer Versuchsanordnung zu tun, bei der größere Wege meßbar werden. Der Versuch an einem den bereits vorgestellten Kerbzugkörpern vergleichbaren gekerbten Biegebalken zeigt einen Durchriß bei einer Rißöffnungsverschiebung CMOD von über einem Millimeter. Beim vergleichbaren Kerbzugkörper erlischt das Zugtragverhalten bei einem CMOD-Wert von etwa 0.2 mm. Der Riß entwickelt sich vom Kerbgrund im Zugbereich allmählich in den Druckgurt hinein. Im untersuchten Nachbruchbereich sind bereits drei Viertel der Ligamenthöhe durchtrennt. Die in Abb. 4.3 dargestellten Bilder einzelner Laststufen zeigen einen effektiven Riß. Letzterer zeichnet das Ende der horizontalen Verschiebung in der Zugzone. Die zugehörige horizontale Ordnung der Streifen deutet auf die Lage der neutralen Faser hin.

Im Vergleich zu den Kerbzugkörpern zeigen die Ergebnisse der gekerbten Biegebalken einen deutlich höheren Wert für  $l_{pr}$ , siehe hierzu Abb. 4.4. Hier werden — je nach Mischung — Ausdehnungen der RPZ wesentlich größer des dreifachen Größtkorns ermittelt. Auch ist der Abfall von  $l_{pr}$  mit zunehmender Rißöffnung ausgeprägter als zuvor beschrieben. Nach Erreichen eines Maximums  $l_{pr,max}$  sinkt die Breite der RPZ bis hin zu einen Wert von ca.  $x \cdot l_{pr,max}$ , wobei  $x$  Werte zwischen 0.95 und 0.5 annimmt. Diese Diskrepanz zu den Kerbzugkörpern läßt sich in den stärkeren Dehnungsgradienten am Rande der Rißufer des Kerbzugkörpers begründen. Die Energiedissipation findet beim Kerbzugkörper in einem schmaleren Werkstoffvolumen statt. Die RPZ eines Biegebalkens kann sich aufgrund der Wirkung der Druckzone vollständig bis zum Erreichen der Biegezugfestigkeit entwickeln. Die Bildung eines Maximums scheint im Fehlen eines tragfähigen Querschnittes bei zunehmender Rißöffnung sowie im heterogenen Gefüge des Werkstoffes Beton begründet. Die Energiedissipation erfolgt lokal; gemessen wird eine integrale Bruchenergie über die Ligamentenhöhe.

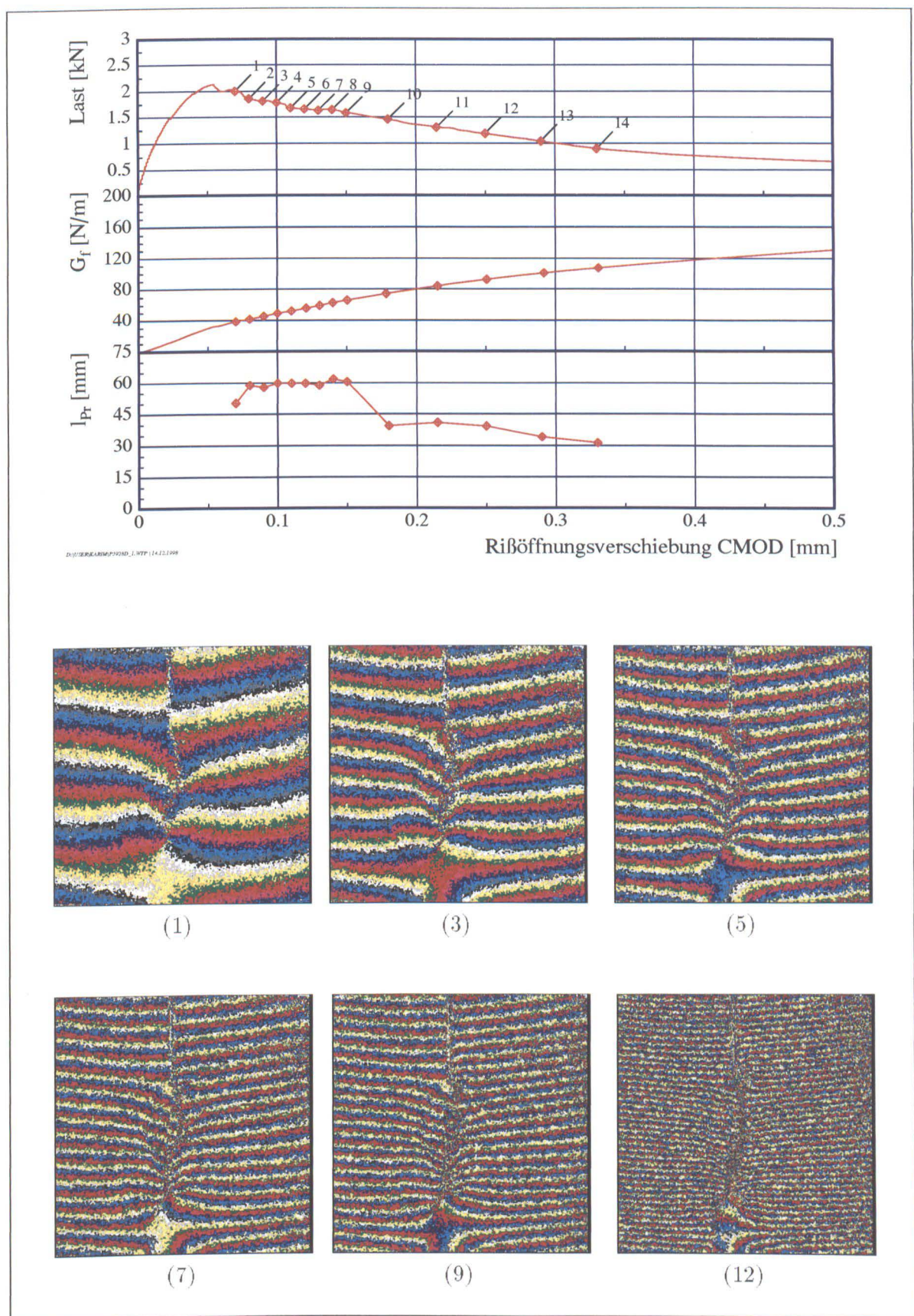
#### 4.4 Einfluß des Hydratationsfortschritts auf die Entwicklung der Rißprozeßzone

Mit zunehmenden Hydratationsfortschritt verlagert sich der Rißverlauf. Neben einer Steigerung der zentrischen Zugfestigkeit verlaufen die Risse in einer zugbeanspruchten Betonprobe zunächst in der Verbundzone Zuschlag-Zementstein und in der Zementsteinmatrix; mit zunehmender Erhärtung verlaufen die Risse in erheblichem Maße durch die Zuschlagkörner. Dieses Erkenntnis wird beispielsweise durch die Abnahme der Rauigkeit von Betonbruchoberflächen mit zunehmenden Hydratationsgrad belegt [28]. Aus diesem Grund ist anzunehmen, daß der durch den Hydratationsgrad ausgedrückte Erhärtungszustand einen merklichen Einfluß auf die räumliche Ausdehnung der RPZ ausübt. Abb. 4.5 stellt exemplarisch den Beanspruchungs-Rißöffnungsverlauf gegenüber dem Verlauf der RPZ-Breite in Abhängigkeit von der Rißöffnung von Kerbzugkörpern und gekerbten Biegebalken dar. Beim Kerbzugkörper nimmt die Breite der RPZ (bei der Mischung) mit zunehmenden Alter zu, die Sprödhheit nimmt zu. Beim gekerbten Biegebalken hingegen sind die Verläufe von  $l_{pr}$  nach 2d und 28d sehr ähnlich, insbesondere was die Größenordnung angeht.  $l_{pr}$  findet ihr Maximum bei etwa 55–60 mm, während sie nach 7d die Größenordnung von 40 mm annimmt.

Der Verlauf der Breite der RPZ mit zunehmender Rißlänge zeigt — wie bereits angesprochen — ein Maximum. Dieses Maximum ist mit der Ausdehnung einer repräsentativen Volumeneinheit gleichzustellen. In diesem Bereich verhält sich der Werkstoff Beton in den untersuchten Versuchskonfigurationen nicht-linear. Wertet man den Einfluß des Hydratations-

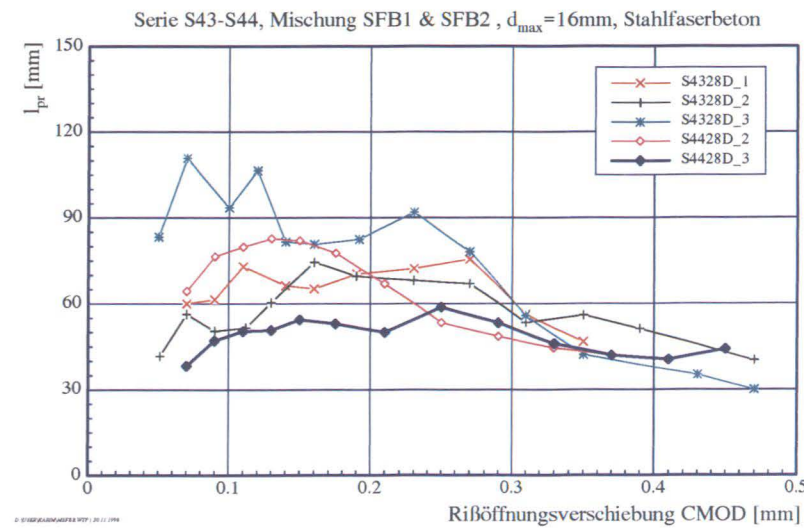
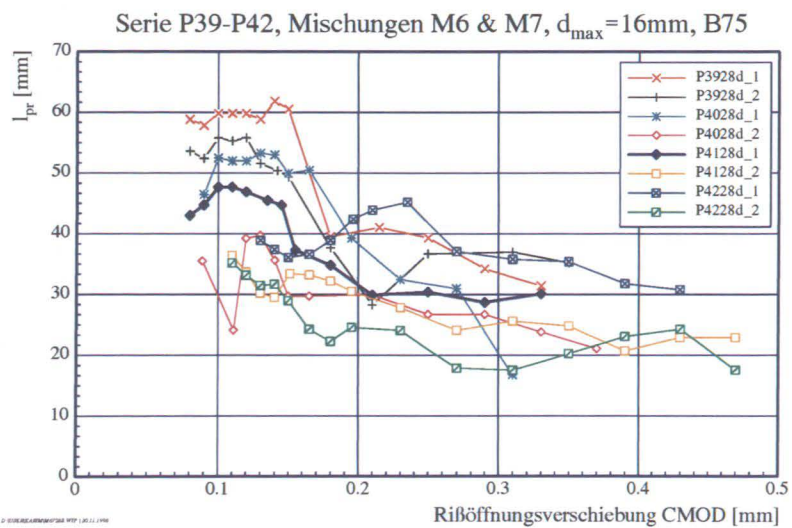
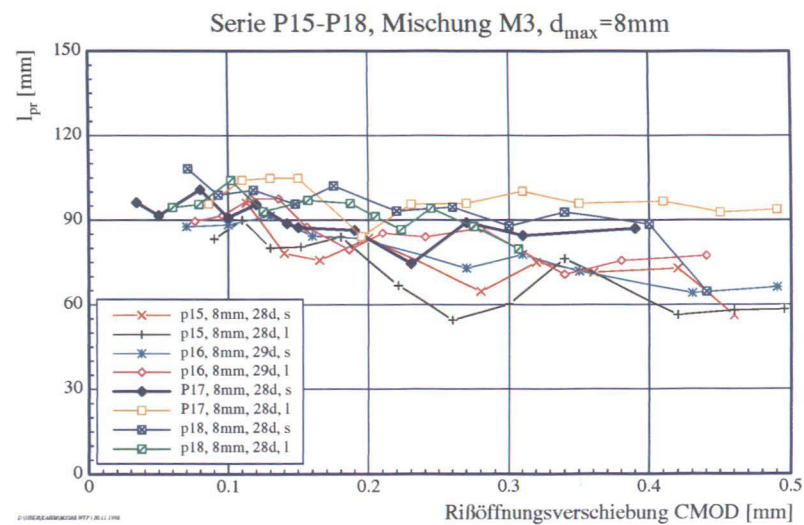
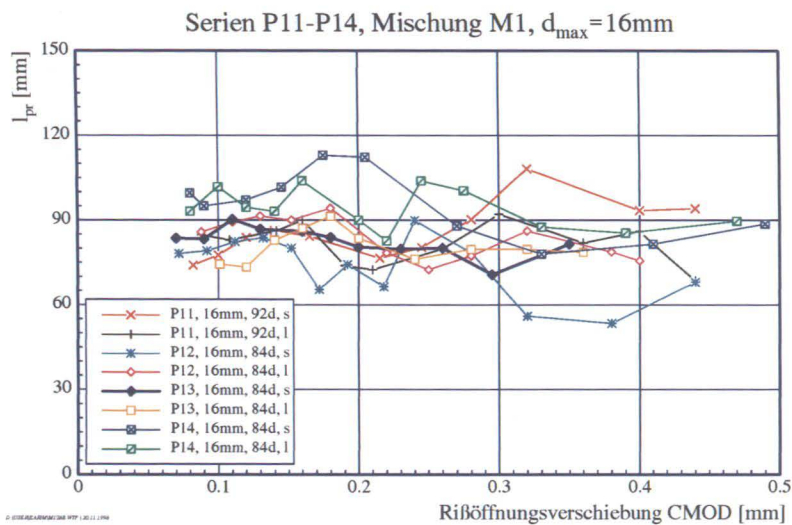
<sup>2</sup>Die beiden Probekörper, an denen die Entwicklung der Streifenmuster im Rahmen des Berichts exemplarisch dargestellt werden, entstammen der gleichen Mischung, so daß ein Vergleich zwischen den Beanspruchungsarten ermöglicht wird. Die Ergebnisse der Variation der einzelnen Versuchsparameter, wie sie im Abschnitt 3 vorgestellt wurden, werden im Anschluß an den detaillierten Versuchsergebnissen zusammengefaßt, s.o.



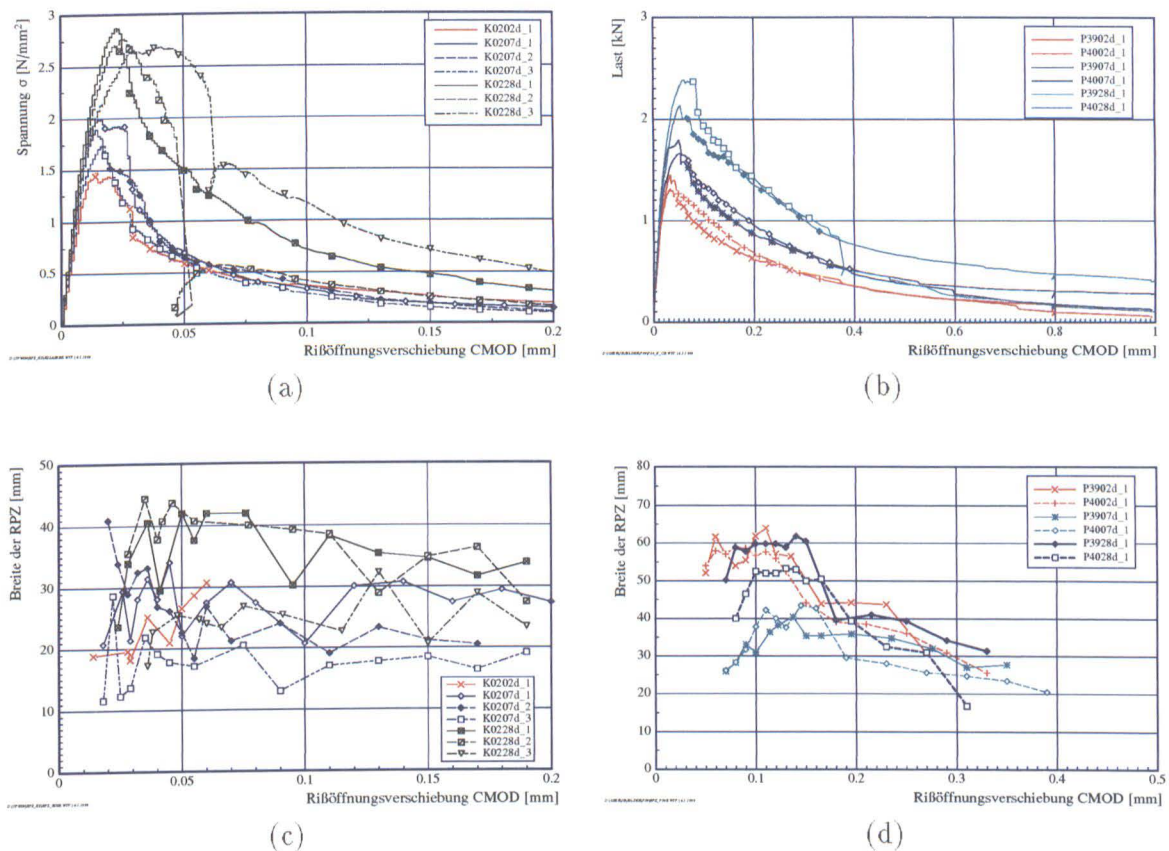


**Abbildung 4.3:** Exemplarischer Verlauf der Last, der Bruchenergie sowie der Breite der Rißprozeßzone in Abhängigkeit von der Rißöffnungsverschiebung (oben) und den Laststufen zugehörigen Korrelationsstreifen in horizontaler Sensitivität am Beispiel der Probe P3928D.1 (B75,  $d_{max} = 16$  mm, Probengröße BG 3).

**Abbildung 4.4:** Entwicklung der Breite der Ribprobenzone an gekerbten Biegebalken exemplarischer Mischungen bei 28 d





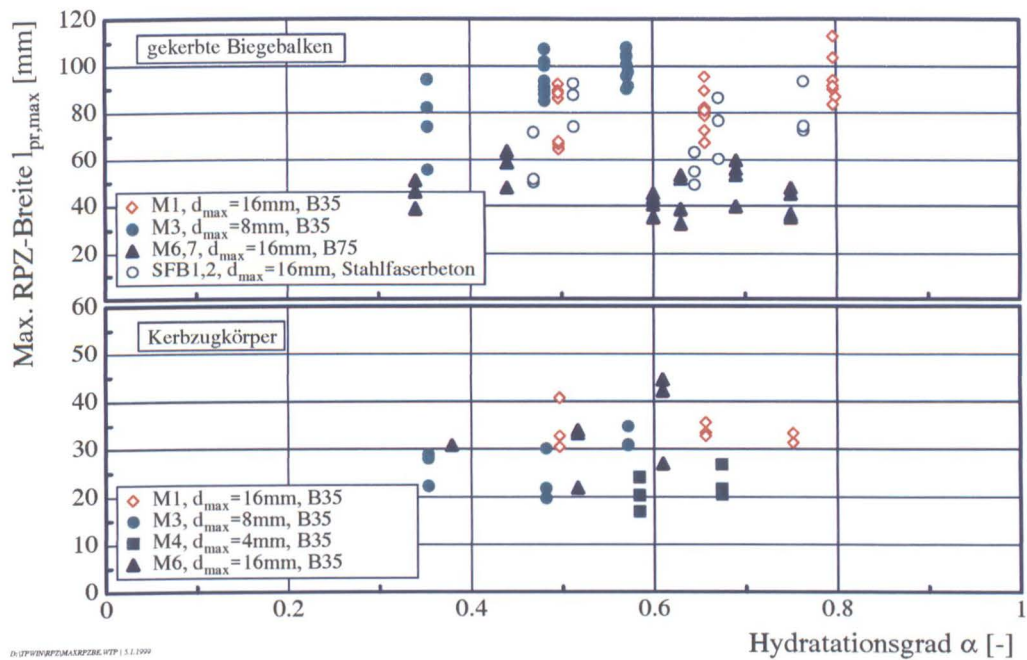


**Abbildung 4.5:** Einfluß des Hydratationsfortschrittes auf den Verlauf der Breite der RPZ von Korbzugkörpern (links) und gekerbten Biegebalken (rechts) von der exemplarischen Mischung M6 (a,b: Beanspruchung vs. CMOD; c,d: Breite der RPZ vs. CMOD)

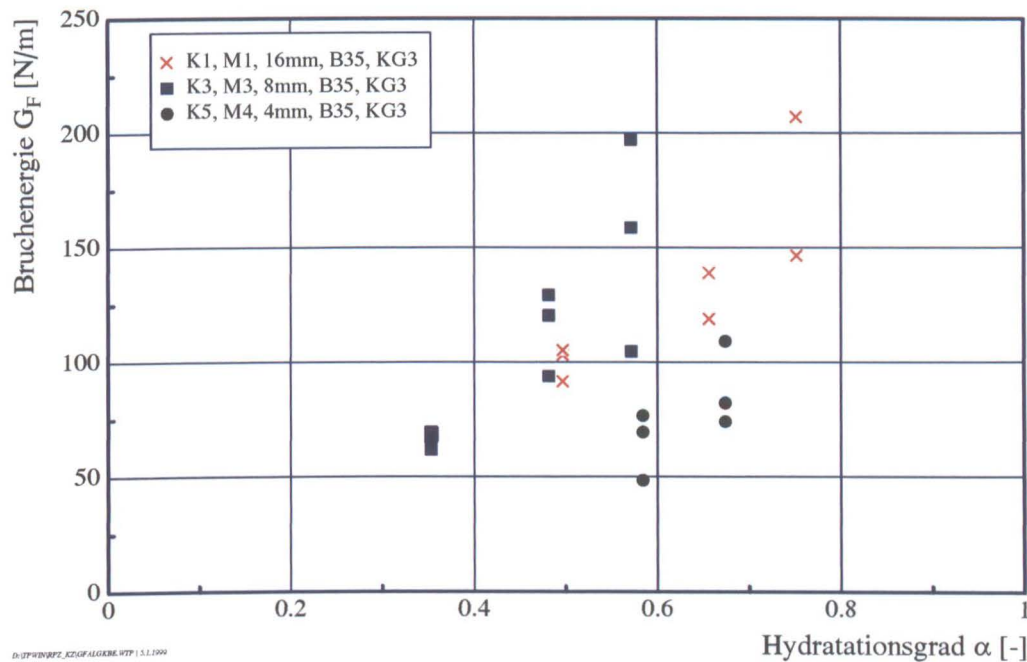
grads auf die Ausbildung eines solchen Maximums aus, so ergeben sich die in Abb. 4.6 dargestellten Verläufe. Zunächst spiegelt sich die starke Diskrepanz zwischen den beiden Modus I-Versuchsanordnungen wieder. Die Größenordnung von  $l_{pr,max}$  im Biegezugversuch ist, abhängig von der Betonzusammensetzung, etwa um einen Faktor zwei bis vier größer als beim einaxialen Zug. Desweiteren ist zu beobachten, daß — unter Berücksichtigung der Streuung der Meßergebnisse —  $l_{pr,max}$  mit steigendem Hydrationsgrad zunächst ansteigt. Nach Erreichen eines Maximums fällt es zu höheren Hydrationsgraden hin ab. Mit fortschreitender Erhärtung verfestigt sich die Verbundzone zwischen Zementstein und Zuschlag, so gewinnt die RPZ an räumlicher Ausdehnung. Mit zunehmender Hydratation wird zudem der Werkstoff Beton spröder, d.h. die Zementsteinmatrix verliert an Zähigkeit, die Bruchenergie steigt (siehe Abb. 4.7). Durch diese Sprödigkeitszunahme verringert sich allmählich die räumliche Ausdehnung der RPZ.

#### 4.5 Einfluß des Größtkorns auf die räumliche Ausdehnung der RPZ

Nach den exemplarisch in Abb. 4.8 dargestellten Verläufen von  $l_{pr}$  in Abhängigkeit von der Rißöffnungsverschiebung für die drei untersuchten Größtkorndurchmessern 4, 8 und 16 mm zu urteilen, spielt das Größtkorn eine eher untergeordnete Rolle. Ein leichter Zuwachs von  $l_{pr}$  ist trotz Streuung ab  $d_{max} = 8$  mm festzustellen. Auch konnte in Abb. 4.6 beobachtet werden,



**Abbildung 4.6:** Entwicklung der maximalen RPZ-Breite  $l_{pr,max}$  mit zunehmender Erhärtung für gekerbte Biegebalken und für Kerbzugkörper jeweils identischer Probengröße in Abhängigkeit vom kalorimetrisch ermittelten Hydratationsgrad.



**Abbildung 4.7:** Exemplarischer Verlauf der Bruchenergie der Kerbzugkörperserien K1, K3 und K5 in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad. Die Bruchenergie wurde als die Fläche unter der Spannungs-Rißöffnungsverschiebung bestimmt.

daß  $l_{pr,max}$  — im Gegensatz zu den Angaben aus der Literaturübersicht — nicht zwingend gröstkornabhängig ist.

#### 4.6 Einfluß der Betonfestigkeit auf die RPZ

Im Gegensatz zum Gröstkorndurchmesser übt die Betonfestigkeit einen deutlicheren Einfluß auf die Ausdehnung der RPZ aus. Abb. 4.9 stellt den CMOD-abhängigen Verlauf von  $l_{pr}$  für gekerbte Biegebalken und Kerbzugkörpern im Alter von 7 Tagen dar. Es zeigt sich, insbesondere im Fall der gekerbten Biegebalken, daß  $l_{pr}$  mit zunehmender Festigkeit abnimmt. Ungeklärt ist hier der Einfluß des Silikastaubs: Zum einen führt die Zugabe von Silikastaub zu einer Verfestigung der Kontaktzone Zementstein-Zuschlag sowie zu einer Festigkeitszunahme im Zementstein aufgrund der Bildung zusätzlicher feinnadeligeren C-S-H-Phasen und somit — siehe oben — zu einer Verminderung des RPZ-Volumens. Desweiteren sorgt die Festigkeitszunahme bei der Zugabe von Silika zu einer Verspröderung des Gefüges. Sie geht mit der Verkleinerung der RPZ einher. Der beobachtete Zusammenhang läßt sich hiermit deuten.

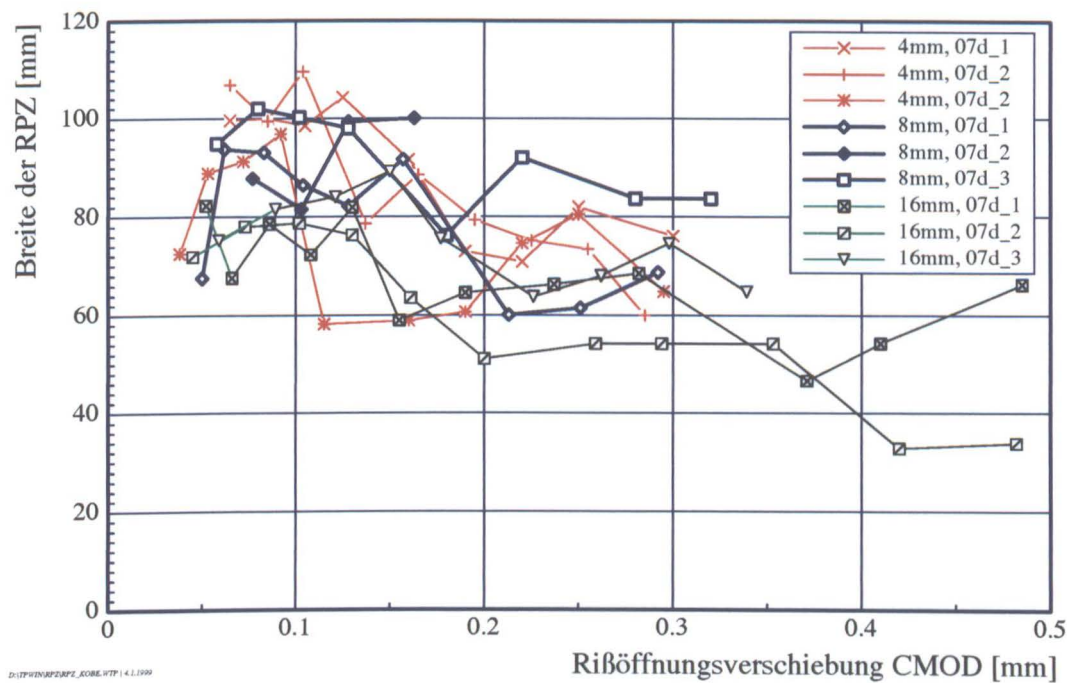
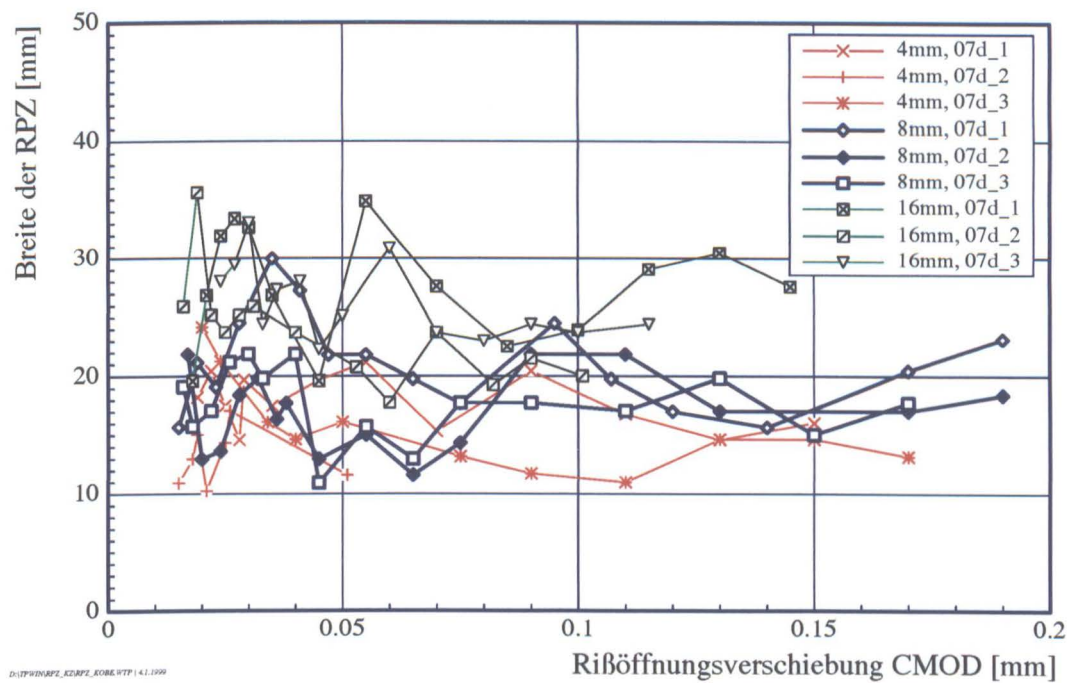
#### 4.7 Einfluß der Probengröße auf die RPZ

Seit BAŽANT [3] ist es bekannt, daß die Probengröße einen merklichen Einfluß auf die mechanischen Kenngrößen zugbeanspruchten Betons ausübt. Beispielhaft seien in Abb. 4.10 Spannungs-Dehnungslinien von Kerbzugkörpern unterschiedlicher Größe im Alter von 2d dargestellt. Die Zugfestigkeit sowie der Zugelastizitätsmodul nehmen mit zunehmender Probengröße ab, während die Zugbruchdehnung im Gegensatz hierzu steigt. Ursache dieses Verhaltens ist die Heterogenität des Werkstoffes. Je größer die untersuchte Probe ist, umso zäher erscheint der Werkstoff Beton. Aus diesem Grund bedarf es der Klärung der Abhängigkeit der räumlichen Ausdehnung der RPZ von der Probengröße. Zur Klärung dieses Zusammenhangs dient Abb. 4.11. Aufgetragen seien hier die Verläufe der RPZ-Breite  $l_{pr}$  über die Riöffnungsverschiebung CMOD für ein Probenalter von 7d. Eine deutliche Zunahme von  $l_{pr}$  bei größer werdender Probe ist zu beobachten. Wie eingangs berichtet, konvergiert der Wert von  $l_{pr}$  nach Erreichen des Maximums gegen einen Wert  $x \cdot l_{pr,max}$ . Je größer die untersuchte Probe ist, umso kleiner wird  $x$ . Diese Beobachtung gilt sowohl für Kerbzugkörper als auch für gekerbte Biegebalken. Diese Erscheinung deutet auf eine nicht-vollständige Ausbildung der RPZ bei kleineren Proben. Eine solche Begründung deckt sich mit der Aussage des Maßstabeffekts. Bei geringeren Probenabmessungen versagt der Werkstoff nach Erreichen seiner Zugfestigkeit  $f_{ct}$ .  $f_{ct}$  ist probengrößenunabhängig und als Werkstoffkennwert zu betrachten.

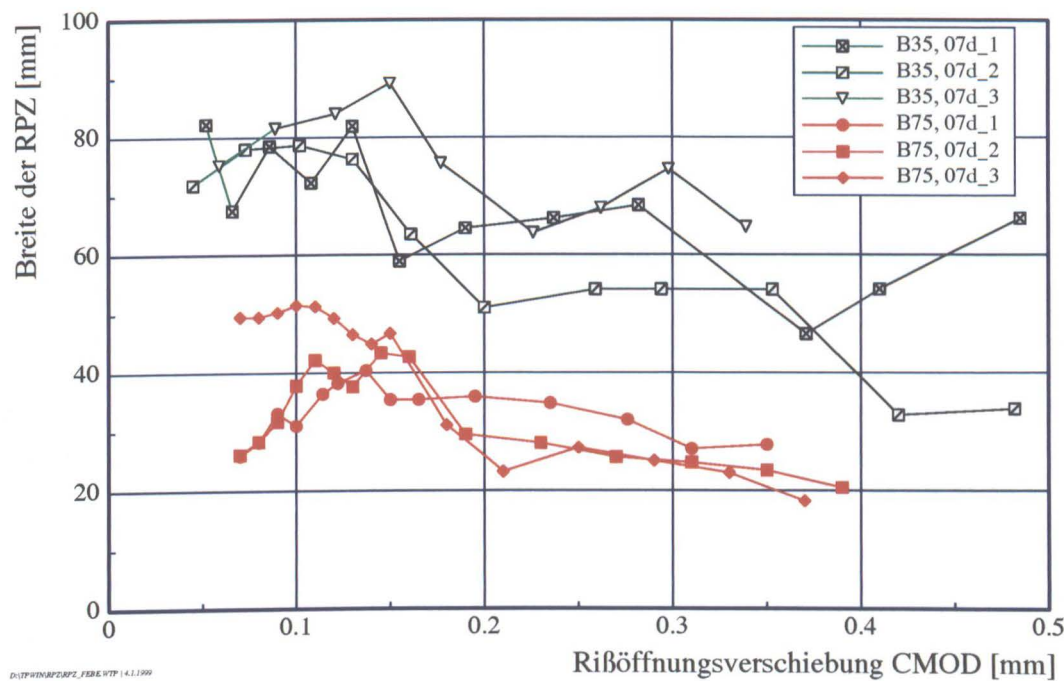
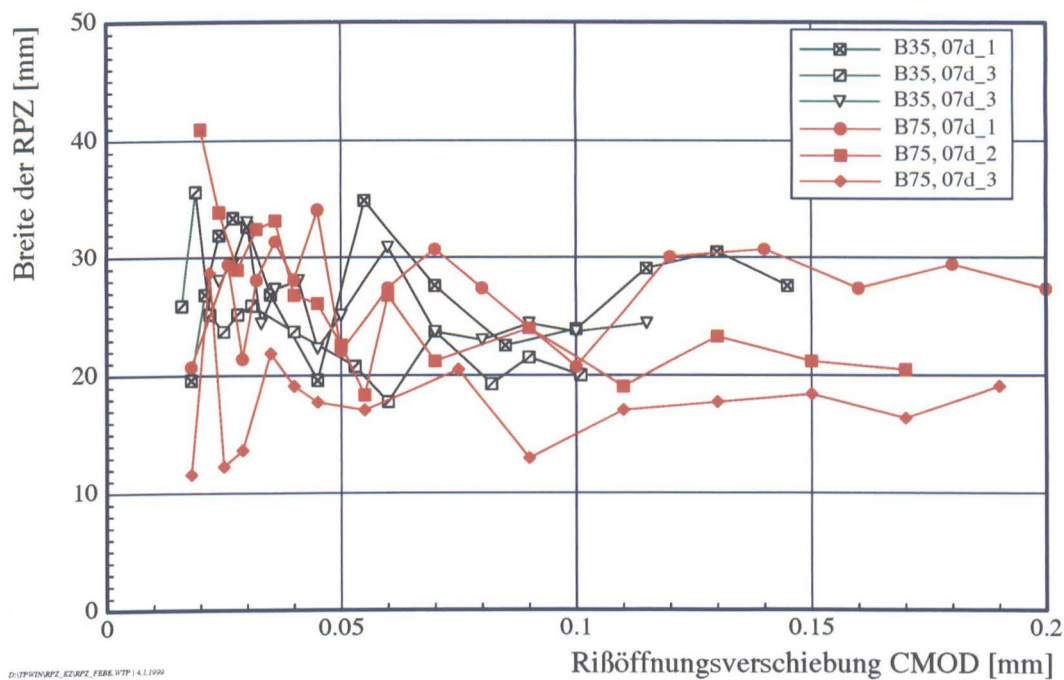
#### 4.8 Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die RPZ

REINHARDT & CORNELISSEN [37] stellen fest, daß die Spannungs-Verformungslinie im verformungsgesteuerten Zugversuch von der Verformungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Auch LAUBE [29] weist hierauf hin. Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Versuche bestätigen zwar den Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Zugspannungsdehnungslinie, die Abhängigkeit der Riöprozeßzonenbreite von der Verformungsgeschwindigkeit konnte — im Rahmen des experimentellen Streubereichs — nicht nachgewiesen werden. Abb. 4.12 stellt einzelne gewonnene Versuchsergebnisse an gekerbten Biegebalken exemplarisch dar. Aus der Erkenntnis der Versuche an gekerbten Biegebalken wurde auf eine Variation der Beanspruchungsgeschwindigkeit bei den Versuchen an Kerbzugkörpern verzichtet.

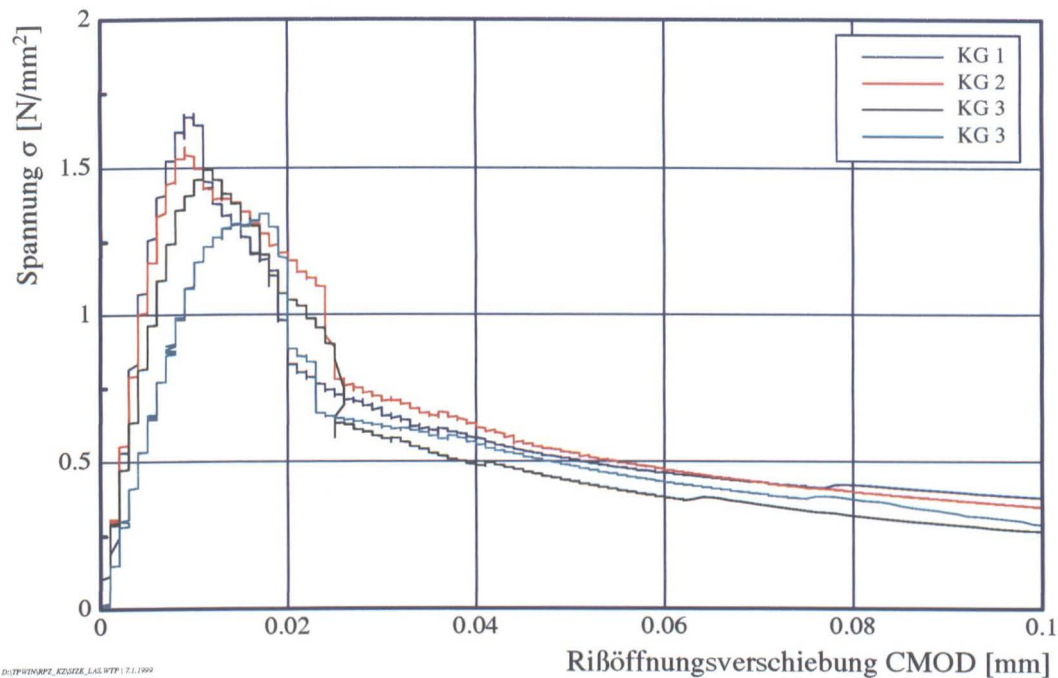




**Abbildung 4.8:** Einfluß des Größtkorns auf den Verlauf der Breite der RPZ von Kerbzugkörpern (oben) und gekerbten Biegebalken (unten) bei einem Alter von 7d



**Abbildung 4.9:** Einfluß der Betonfestigkeit auf den Verlauf der Breite der RPZ von Kerbzugkörpern (oben) und gekerbten Biegebalken (unten) bei einem Alter von 7d



**Abbildung 4.10:** Einfluß der Probengröße auf die Spannung-Dehnungslinie von Kerbzugkörpern bei einem Alter von 2d

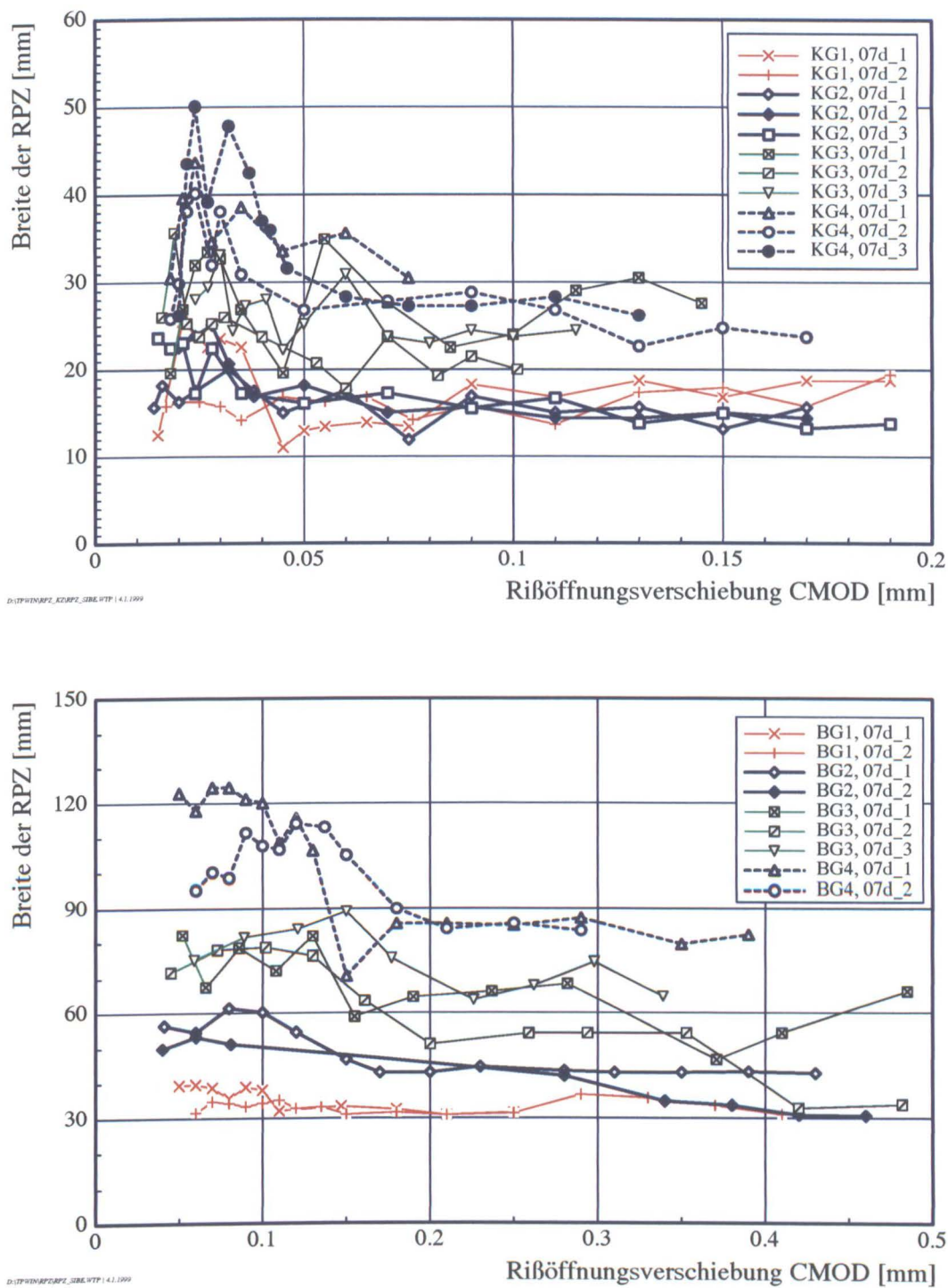
## 5 Numerische Verifizierung der Versuchsergebnisse

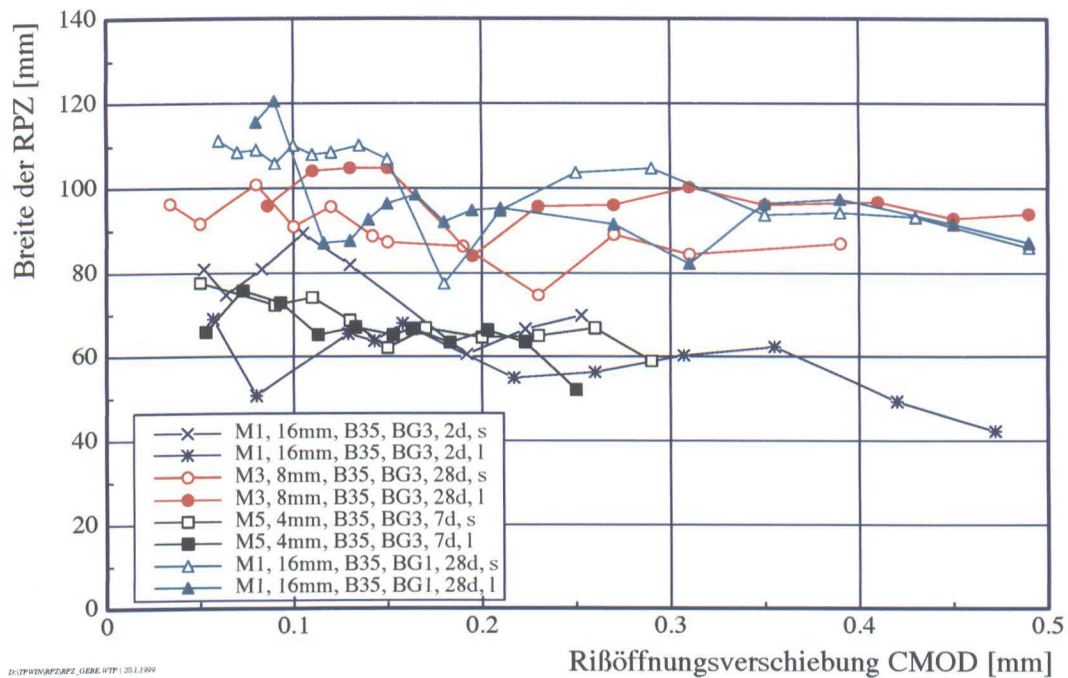
Die numerische Verifizierung der durchgeführten Versuche mit dem ermittelten Verlauf der Breite der RPZ in Abhängigkeit von der Rißöffnungsverschiebung CMOD erfolgt mittels eines eigens implementierten Lamellenmodells am gekerbten Biegebalken im Dreipunktbiegeversuch. Im folgendem wird zunächst der Berechnungsalgorithmus vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Darstellung der angewandten Werkstoffmodelle, insbesondere wird auf die Modellierung von  $l_{pr}$  eingegangen. Es folgen numerisch erzielte Ergebnisse, die im Rahmen der durch die Inhomogenität des Werkstoffes Beton verursachten Streuung bewertet werden. Auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse von Vor- und Sensitivitätsstudien wird im Rahmen des hier vorliegenden Berichts verzichtet.

Die untersuchten Biegebalken werden über die Balkenhöhe in Form von nicht gekoppelten Lamellen gleicher Dicke diskretisiert. Schubspannungen finden keine Beachtung, da die Berechnung des äußeren Momentes über die Spannungsverteilung in der Symmetrie-Achse erfolgt. Die einzelnen Lastschritte werden "weggesteuert" berechnet: Bei Vorgabe eines CMOD-Inkrementes wird die Spannungsverteilung über das Ligament und das außen anliegende Moment bei ebenbleibenden Querschnitten so berechnet, daß nach Ermittlung der Schwerpunkte in der Zug- und in der Druckzone die Summe der Normalkräfte verschwindet, siehe Abb. 5.1. Die Iteration erfolgt über eine Newtonsche Nullstellensuche der Lage der neutralen Faser. Abb. 5.2 zeigt die Struktur der Berechnung.

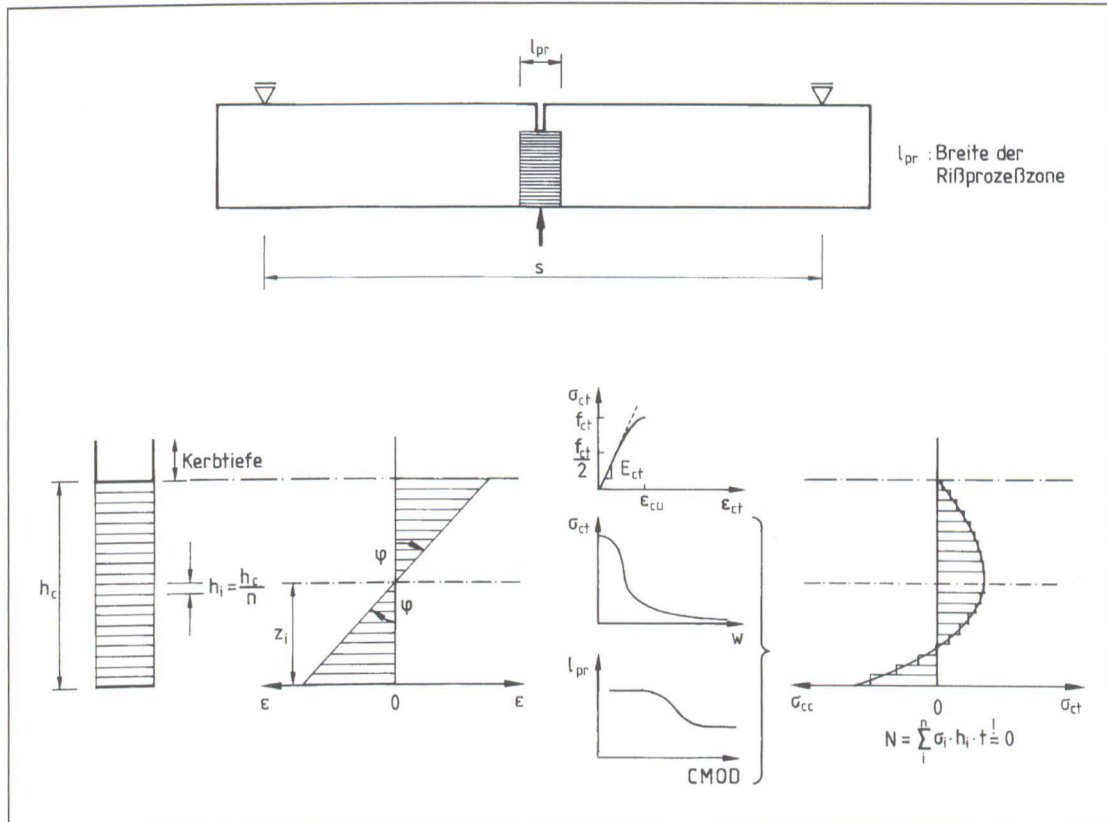
Die Anzahl der Lamellen liegt in der Größenordnung von 100. Sensitivitätsstudien haben gezeigt, daß die Lamellenanzahl keine merkliche Veränderung des Ergebnisses hervorruft. Es ist lediglich zu beachten, daß eine zu geringe Anzahl von Lamellen die Konvergenz der Berechnungen u.U. so beeinträchtigt, daß Unstetigkeiten an der Rißspitze entstehen. Rechnungen haben gezeigt, daß etwa 20 Lamellen mindestens erforderlich sind. Eine Erhöhung der Lamellenanzahl







**Abbildung 4.12:** Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit auf den Verlauf der Breite der RPZ von gekerbten Biegebalken bei einer exemplarischen Betonzusammensetzung



**Abbildung 5.1:** Prinzipsskizze des angewandten Lamellenmodells. Ausgehend von einer ebenen Dehnungsverteilung wird die Spannungsverteilung unter Berücksichtigung von deterministischen Werkstoffgesetzen ermittelt.

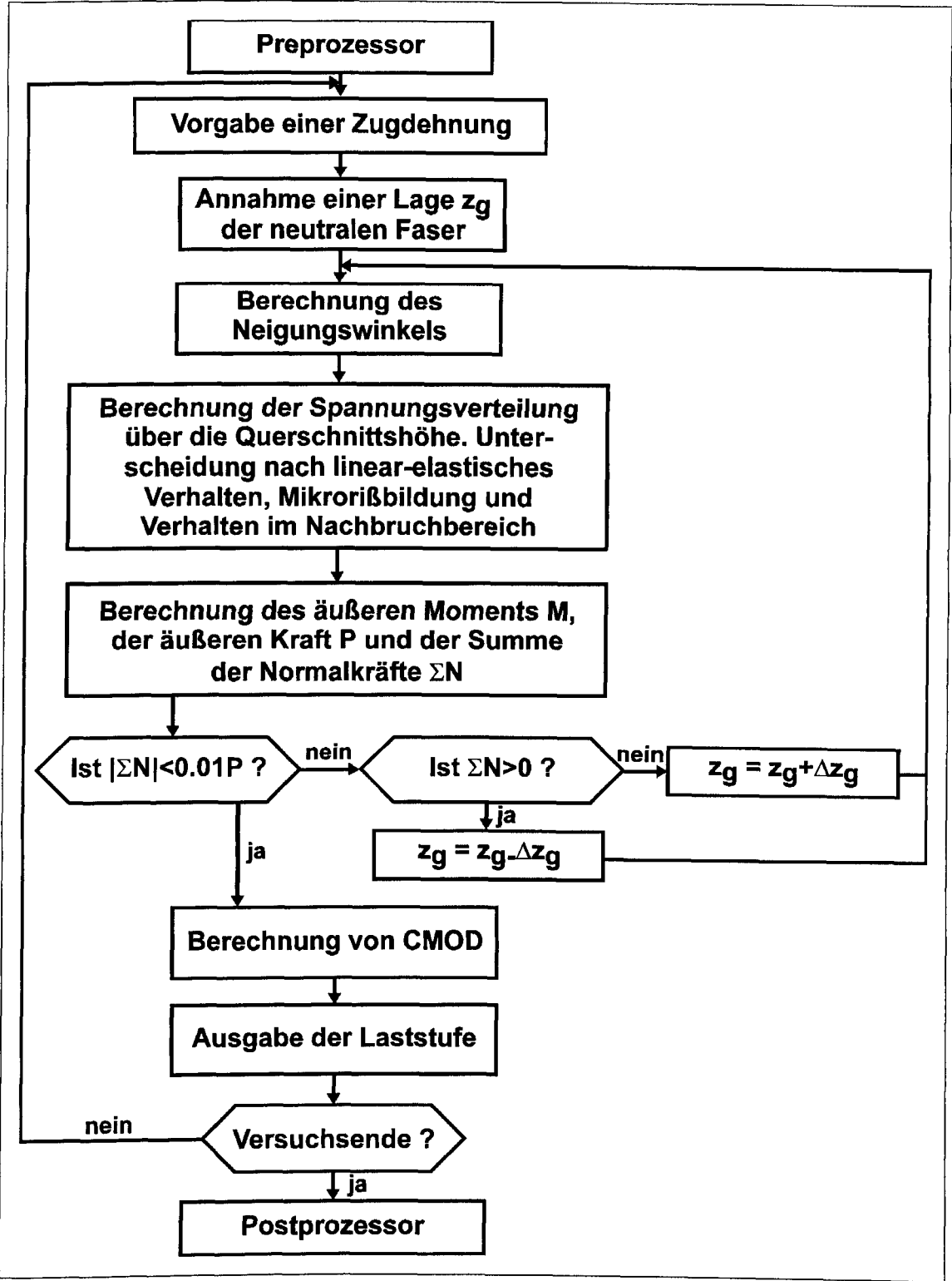


Abbildung 5.2: Struktogramm des Berechnungsalgorithmus

auf ca. 1000 führt zu verlängerten Rechenzeiten und ergeben zudem keinen wesentlichen Gewinn bzgl. der Rechengenauigkeit, lediglich wird die Spannungsverteilung über die Balkenhöhe stetiger. Die Wahl von 100 Lamellen stellt einen guten Kompromiß zwischen Rechenzeit und Stetigkeit der Rechenergebnisse dar.

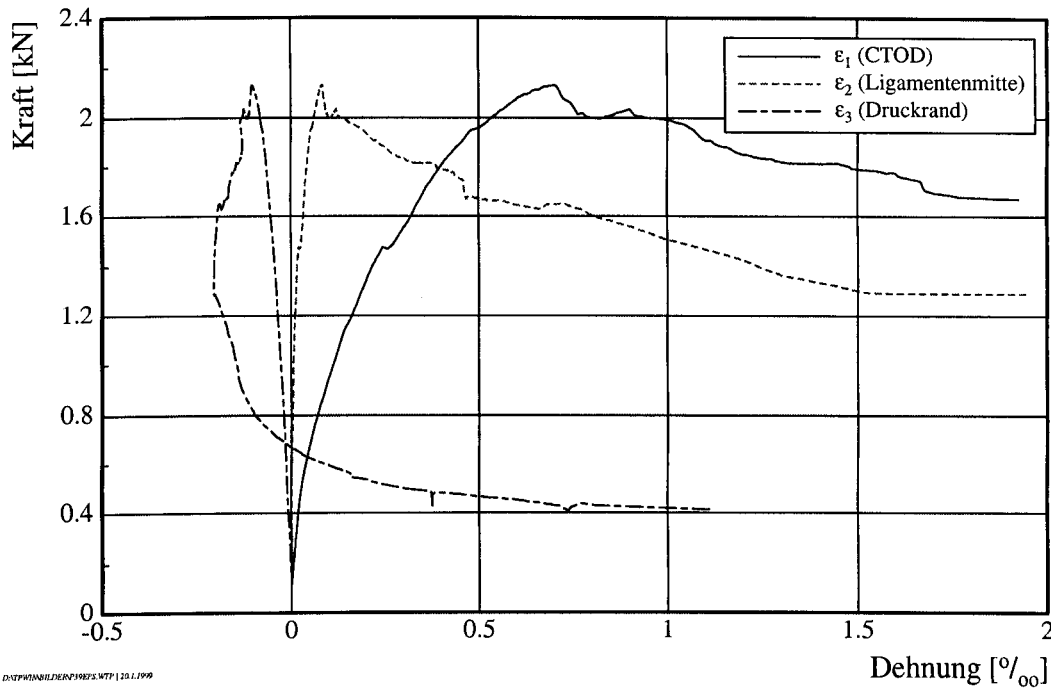
Die Lamellen werden mit identischen Werkstoffeigenschaften ausgestattet. An dieser Stelle findet keine stochastische Verteilung der Werkstoffeigenschaften statt, die ein Streuband der Rechenergebnisse zu liefern erlaubt. Es werden sowohl die Zugspannung-Dehnungslinie (Z-SDL) als auch die Druckspannung-Dehnungslinie (D-SDL) modelliert. Die Druckspannung-Dehnungslinie ist ein affines Abbild der Zugspannung-Dehnungslinie. Ihr ansteigender Ast wird im folgenden nach GUTSCH [13] formuliert.

Bis zu einer Spannung von  $0.5 \cdot f_{ct}$  wird das Zugtragverhalten linear angenommen. Die Steigung des linearen Astes der Z-SDL wird durch den Zugelastizitätsmodul  $E_{ct}$  beschrieben, der als Sekantenmodul zwischen  $0.05 \cdot f_{ct}$  und  $0.5 \cdot f_{ct}$  zu ermitteln ist. Ab  $0.5 \cdot f_{ct}$  wird die Mikrorißbildung im ansteigenden Ast der Z-SDL steifigkeitsmindernd berücksichtigt. Sie führt zu einer zusätzlichen Rißdehnung, die sich zur elastischen Dehnung überlagert. Die gewählte exponentielle Formulierung der Z-SDL erfüllt zwei Stetigkeitsbedingungen: zum einen sind beim Übergang aus dem linear-elastischen Anteil der Z-SDL in den nicht linear-elastischen Anteil die Steigungen der Kurven gleich  $E_{ct}$  und zum anderen gewährt das gewählte Modell eine horizontale Tangente bei  $\sigma_{ct} = f_{ct}$ .

Die Modellierung des Zugtragverhaltens im Nachbruchbereich erfolgt durch die Beschreibung der Zugspannung-Rißöffnung in Form eines modifizierten Kornmodells nach DUDA [10]. Das Modell nach DUDA besteht aus zwei parallel geschalteten Reibelementen. Das erste Element beschreibt den bei kleinen Rißbreiten  $w$  steil abfallenden Teil der Zugspannung-Rißöffnungsbeziehung als sukzessive Zerstörung des Korn-Matrix-Haftverbundes. Das zweite Element hingegen faßt den flachen Verlauf der  $\sigma_{ct}$ - $w$ -Kurve als Reibung zwischen Korn und Matrix infolge Verzahnung auf. Mathematisch werden beide Lastübertragungsmechanismen durch eine Gauß- bzw. eine Poisson-Verteilung beschrieben. Die Formulierung nach DUDA [10] führt jedoch zu einer Unstetigkeit im Verlauf der Spannung-Dehnungslinie, da ihre erste Ableitung bei  $\sigma_{ct} = f_{ct}$  nicht verschwindet. GUTSCH [13] schlägt vor, die Poisson-Verteilung mit einem Exponenten größer 1 zu versehen, so daß sich eine horizontale Tangente ergibt. Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß eine bessere Übereinstimmung der Formulierung nach dem Kornmodell mit den erzielten Versuchsergebnisse dann gelingt, wenn ein zusätzlicher Reibungsterm in Form einer Poisson-Verteilung eingeführt wird.

Die Spannungsübertragung im Nachbruchbereich erfolgt über den Bereich der Rißprozeßzone, deren Breite experimentell erfaßt wurde. Die experimentellen Ergebnisse haben gezeigt, daß — zumindest nach dem Erreichen der Maximallast —  $l_{pr}$  zunächst ansteigt, um allmählich — im auswertbaren Bereich der Spannung-Rißöffnungsbeziehung — auf einen Wert zwischen  $0.5 \cdot l_{pr,max}$  und  $0.95 \cdot l_{pr,max}$  zu fallen. Der Abfall ist sowohl von der Betongüte als auch von der Probengröße maßgeblich beeinflusst. Es müssen jedoch als Randbedingungen gelten, daß  $l_{pr}(CMOD = 0) = 0$  gilt, da die RPZ zunächst anwächst. Im nicht angerissenen Zustand ist sie noch nicht gebildet. Desweiteren ist anzunehmen, daß  $l_{pr}(CMOD)$  nicht mit einer vertikalen Tangente bei  $CMOD=0$  mm anwächst. Zu größeren  $CMOD$ -Werten hin konvergiert  $l_{pr}$  gegen einen Wert, der nahe null zu vermuten ist. Dies ist damit zu begründen, daß der tragfähige Querschnitt, der die Weiterbildung der RPZ erlaubt, bei nahezu durchgerissenem Ligament verschwindet. Eine Kombination aus einer exponentiellen Funktion und einer Hyperbel erfüllt die eben genannten Bedingungen.

Die Bestätigung der veränderlichen Breite der RPZ kann u.a. damit bestätigt werden, daß die Bruchenergie nicht über die Ligamentenhöhe konstant ist. Abb. 5.3 bestätigt diese Hypothese. Hier sind die Kraft-Dehnungsverläufe dargestellt, die mit drei Dehnungsmeßstreifen mittig und



**Abbildung 5.3:** Gemessene Dehnungsverläufe über die Ligamentenhöhe des Balkens Balkens P3928d.1

an den äußeren Zug- und Druckrändern appliziert wurden. Es zeigt sich, daß die Flächen unterhalb dieser Kurven offensichtlich nicht identisch sind.

Zusammenfassend nimmt das verwendete Werkstoffgesetz folgende Form an:

- Im Abschnitt  $0 \leq \sigma_{ct} \leq 0.5 \cdot f_{ct}$  des ansteigenden Astes der Z-SDL:  
Lineare Elastizität wird unterstellt. Es gilt:

$$\sigma_{ct} = E_{ct} \cdot \varepsilon. \quad (5.1)$$

- Im Abschnitt  $0.5 \cdot f_{ct} \leq \sigma_{ct} \leq f_{ct}$  des ansteigenden Astes der Z-SDL:  
Die Mikroriöbildung wird steifigkeitsmindernd berücksichtigt. Die Stetigkeitsbedingungen bei  $\varepsilon_{0.5} = 0.5 \cdot f_{ct}/E_{ct}$  und bei  $\varepsilon_{cu}$  führen zu folgender Formulierung nach GUTSCH [13]:

$$\sigma_{ct} = 0.5 \cdot f_{ct} \cdot \left[ 2 - \left( 1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{0.5}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{0.5}} \right)^B \right], \quad (5.2)$$

mit den Exponenten

$$B = \frac{E_{ct} \cdot (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{0.5})}{0.5 \cdot f_{ct}} = \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}}. \quad (5.3)$$

- Im abfallenden Ast der Z-SDL:  
Die Beschreibung der Z-SDL erfolgt durch eine modifizierte Formulierung der Zugspannung-Rißöffnungsbeziehung nach DUDA [10]:

$$\sigma_{ct}(w) = \sigma_a \cdot e^{-(w/w_a)^2} + \sigma_b \cdot e^{-(w/w_b)^{1.01}} + \sigma_c \cdot e^{-(w/w_c)^{1.01}}. \quad (5.4)$$

Die Konstanten  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_c$ ,  $w_a$ ,  $w_b$  und  $w_c$  werden aus nicht-linearer Regression von Versuchsergebnissen gewonnen.



- Der abfallende Ast der Z-SDL wird über die RPZ berechnet. Die Breite der RPZ wird beschrieben durch:

$$l_{pr} = a \cdot \frac{l_{pr,max}}{CMOD_{pr,max}} \cdot \frac{CMOD^b}{CMOD_{pr,max} + \left( \frac{CMOD}{CMOD_{pr,max}} \right)^c - d \cdot CMOD}, \quad (5.5)$$

wobei die Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$  durch nicht-lineare Regression ermittelt werden. In denen gehen die Versuchsparameter Hydratationsgrad, Betonfestigkeit und Probengröße ein.  $(CMOD_{pr,max} ; l_{pr,max})$  sind die Koordinaten des Maximums von  $l_{pr}$  vs.  $CMOD$ .

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden mit den o.g. Stoffgesetzen einige numerische Berechnungen durchgeführt. Abb. 5.4 zeigt beispielhaft die Einbindung dieser Stoffmodelle im Fall des gekerbten Biegebalkens P3928d\_1 (Mischung M6, Größe BG 3). Das Ergebnis einer Simulationsrechnung für obigen Balken ist in Abb. 5.5 dargestellt. Der Balken wurde in 80 Lamellen diskretisiert. Die Kerbtiefe wurde (wie im Versuch) mit 43 mm angenommen.

Das Berechnungsverfahren erlaubt Spannungsanalysen im Ligamentbereich des untersuchten Biegebalkens. Abb. 5.6 zeigt die Spannungsverteilung im Ligamentquerschnitt für unterschiedliche Laststufen. Hier ist die Einhaltung der Gleichgewichtsbedingungen gut verdeutlicht, die Flächen unter den Zug- und Druckflanken sind identisch. Desweiteren ist zu beobachten, daß die Nulllinie — siehe auch Abb. 4.3 — mit zunehmender Rißöffnungsverschiebung zum Druckrand hinwandert. Bei Laststufe 8 ist zu beobachten, daß die Rißweite den Grenzwert von  $160 \mu m$  überschritten hat, so daß die oberen 16 mm des Ligaments keine Zugtragfähigkeit aufweisen. Die maximale Druckspannung beträgt hier im Druckrand  $9.43 N/mm^2$ . Es handelt sich um eine Druckspannung, die sich noch im reinen linear-elastischen Bereich befindet.

Grundsätzlich ist eine gute Übereinstimmung — im Rahmen der Streubreite — der experimentellen Untersuchungen mit der Simulation zu erkennen. Zu beobachten ist, daß die Beanspruchung im Nachbruchbereich etwas überschätzt wird. Die Differenz zwischen Messung und Rechnung deckt sich mit dem Unterschied zwischen RPZ-Modell und gemessener RPZ-Breite, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Rechnung und die Messung in sich schlüssig sind. Desweiteren ist zu bedenken, daß keine Entlastung im Nachbruchbereich im Rahmen dieser Berechnung berücksichtigt wurde.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit sind bruchmechanische Untersuchungen an jungem Beton durchgeführt worden. Kerbzugversuche und gekerbte Biegebalken wurden weggesteuert beansprucht. Optische Messungen während einzelner Laststufen mittels der hochauflösenden, rückwirkungs- und zerstörungsfreien Methode der elektronischen Speckle Muster Interferometrie erlaubten indessen die räumliche Ausdehnung der Rißprozeßzone (RPZ) zug- bzw. biegezugbeanspruchten Betons zu vermessen. Die RPZ wird als das Betonvolumen angesehen, in dem Mikrorißbildung und -schließung sowie Energiedissipation erfolgt.

Da bis heute nur wenige experimentelle Studien über die Breite der Zone hoher Energiedissipation vorliegen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Betone mit unterschiedlichen Größtkorndurchmessern und Festigkeiten untersucht. Desweiteren wurde das Betonalter, die Beanspruchungsgeschwindigkeit und die Probengröße variiert. Es hat sich gezeigt, daß sowohl beim Kerbzugkörper als auch beim gekerbten Biegebalken das Betonalter — ausgedrückt durch den kalorimetrisch ermittelten Hydratationsgrad —, die Betonfestigkeit und die Probengröße einen nennenswerten Einfluß auf die räumliche Ausdehnung der RPZ  $l_{pr}$  ausüben.

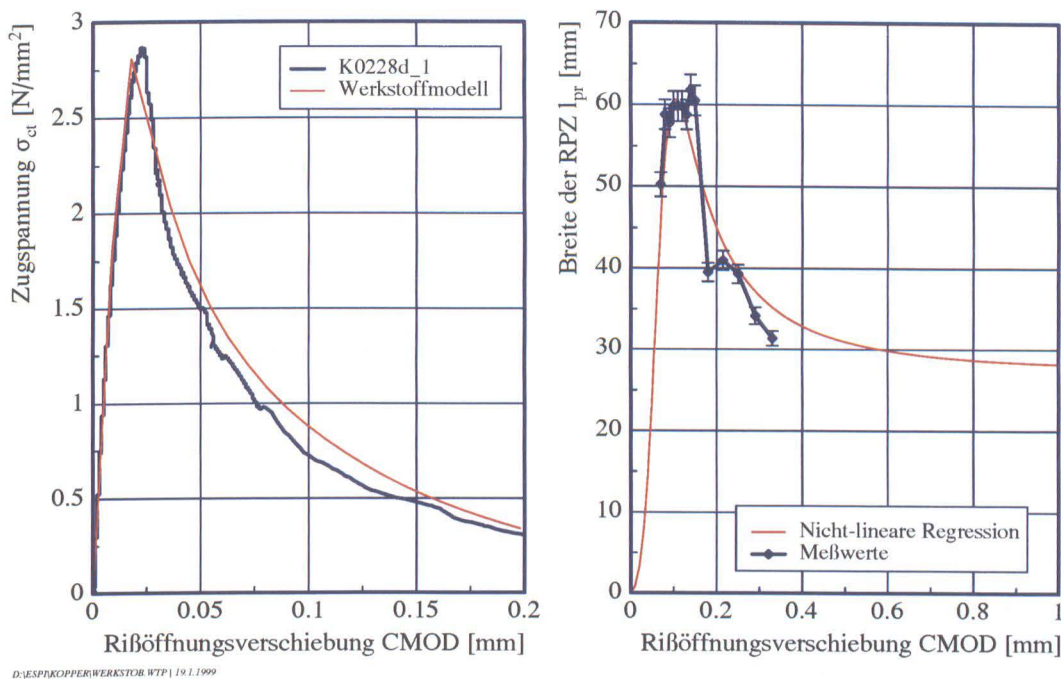


Abbildung 5.4: Darstellung der verwendeten Werkstoffmodelle am Beispiel des Balkens P3928d\_1

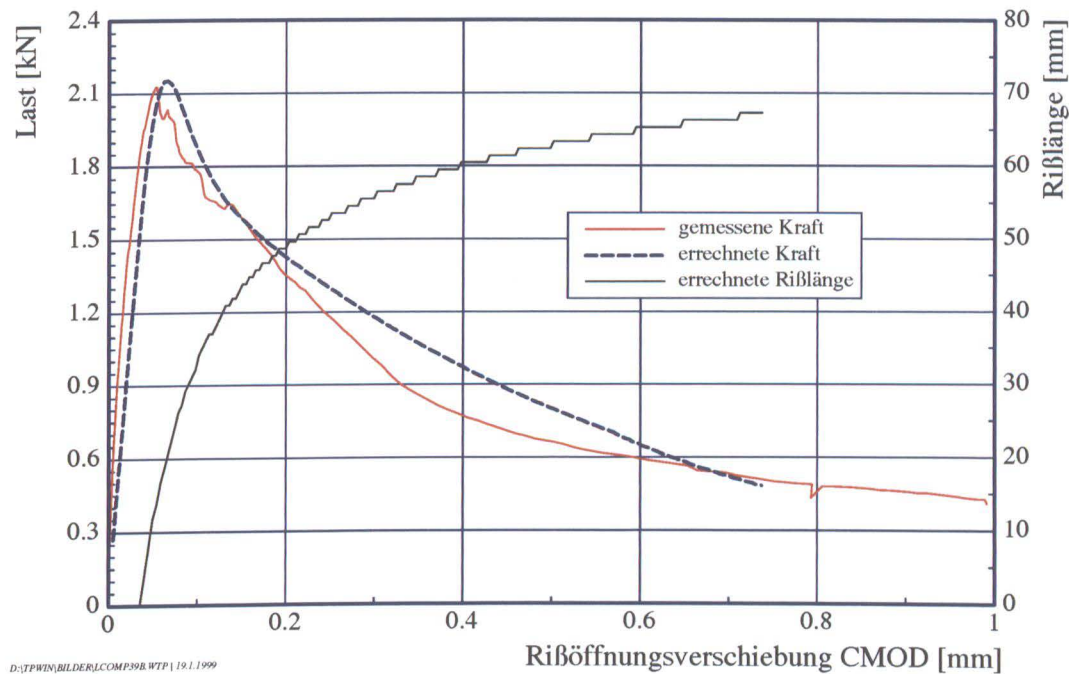
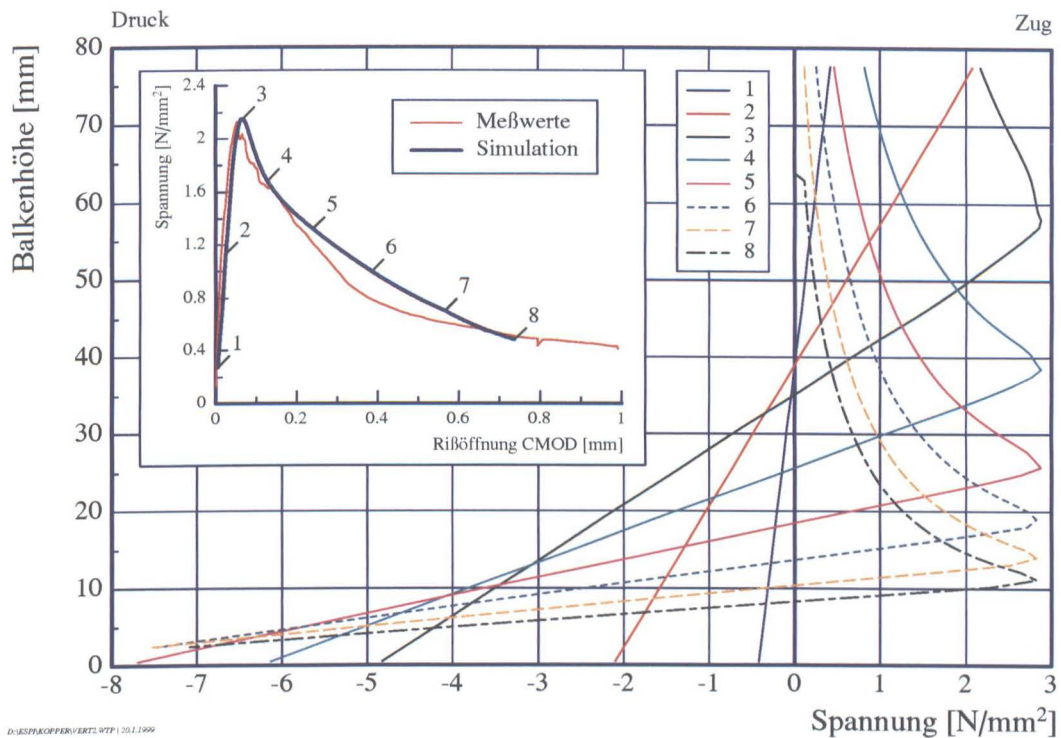


Abbildung 5.5: Exemplarisches Ergebnis einer Simulationsrechnung am Beispiel des Balkens P3928d\_1



**Abbildung 5.6:** Berechnete Spannungsverteilung entlang des Ligaments des Balkens P3928d\_1

Zur numerischen Verifizierung der erzielten Meßergebnisse wurden gekerbte Biegebalken in Form eines Lamellenmodells diskretisiert. Nach der Formulierung eines Werkstoffgesetzes zur Beschreibung von  $l_{pr}$  konnten die experimentell ermittelten Daten bestätigt werden. Im Rahmen der Streubreite konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Meß- und den Rechendaten erzielt werden. In zukünftigen Arbeiten wird statt eines deterministischen Ansatzes zur Beschreibung der Materialeigenschaften jeder einzelnen Lamelle ein probabilistischer Ansatz eingesetzt, so daß die Streuung der Betoneigenschaften Berücksichtigung finden können.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] F. ANSARI: Stress-Strain Response of Microcracked Concrete in Direct Tension in *ACI Materials Journal*, **84**, 481, 1987.
- [2] Z.P. BAŽANT & B.H. OH: Crack Band Theory for Fracture of Concrete in *Materials and Structures*, **16**, 155, 1983.
- [3] Z.P. BAŽANT: Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal in *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **110**, 518, 1984.
- [4] Z.P. BAŽANT (HRSG.): *Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS)*, Proceedings of the First International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS1), Breckenridge, Colorado, Elsevier Applied Science, 1992.
- [5] W. BRAMESHUBER: *Bruchmechanische Eigenschaften von jungem Beton*, Dissertation, Heft 5, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Hrsg. J. EIBL & H.K. HILDORF, 1988.
- [6] A. CASTRO-MONTERO, S.P. SHAH & R.A. MILLER: Strain Field Measurement in Fracture Process Zone in *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **116**, 2463, 1990.
- [7] L. CEDOLIN, S. DEI POLI & I. IORI: Tensile Behavior of Concrete in *Journal of Engineering Mechanics*, **113**, 431, 1987.
- [8] J.J. DU, A.S. KOBAYASHI & N.M. HAWKINS: Fracture Process Zone of a Concrete Fracture Specimen in *Proceedings of the SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock*, ed. by S.P. SHAH & S.E. SWARTZ, Houston, Texas, 199, 1987.
- [9] J.J. DU, A.S. KOBAYASHI & N.M. HAWKINS: An Experimental-Numerical Analysis of Fracture Process Zone in Concrete Fracture Specimens in *Engineering Fracture Mechanics*, **25**, 15, 1990.
- [10] H. DUDA: *Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung*, DafStb, Heft 419, 1991.
- [11] K. GALANULIS & R. RITTER: Speckle Interferometry in Material Testing and Dimensioning of Structures in *SPIE*, **2004**, 269, 1993.
- [12] A. GRIFFITH: The Phenomenon of Rupture and Flow in Solids in *Philosophical Trans.*, Royal Society of London, Series A, **221**, 163, 1921.
- [13] A.-W. GUTSCH: *Stoffeigenschaften jungen Betons — Versuche und Modelle*, Dissertation, TU Braunschweig, 1998.
- [14] E. HACK, T. STEIGER & H. SADOUKI: Application of Electronic Speckle Interferometry (ESPI) to Observe the Fracture Process Zone in [45].
- [15] E.A. HANSEN: Real Time TV-Holography Observations of the Fracture Process Zone in *Micromechanics of Failure of Quasi-Brittle Materials*, ed. by S.P. SHAH, S.E. SWARTZ & M.L. WANG, 504, 1990.
- [16] K. HARIRI & K.-H. SPRENGER: Zur bruchmechanischen Untersuchung des Werkstoffes Beton mittels Laser-Speckle-Interferometrie in *Forschungsarbeiten 1990-1994*, iBMB, Heft 109, 51, 1994.
- [17] K. HARIRI & F.S. ROSTÁSY: Assessment of the Width of the Fracture Process Zone of Concrete with the ESPI-Technique in *Proceedings of the 2nd International Conference on Nondestructive Testing of Concrete in the Infrastructure*, Nashville, Tennessee, June 12-14, Society for Experimental Mechanics, Inc., Bethel, 1996.
- [18] H.G. HEILMANN, H.K. HILSDORF & K. FINSTERWALDER: *Festigkeit und Verformung von Beton unter Zugspannungen*, DafStb, Heft 203, 1969.
- [19] X.Z. HU: *Fracture Process Zone and Strain-Softening in Cementitious Materials*, Building Materials Report No. 1, Institute for Building Materials, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1990.
- [20] G. IVÁNYI: Zugfestigkeit von Beton in örtlich veränderlichen Beanspruchungszuständen — Gradientenwirkung, *Forschungsbericht TU Braunschweig*, 1976.
- [21] P. JACQUOT & P.K. RASTOGI: Speckle Metrology and Holographic Interferometry Applied to the Study of Cracks in Concrete in *Fracture Mechanics of Concrete*, ed. by F.H. WITTMANN, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1983.
- [22] Y. JENQ & S.P. SHAH: Two Parameter Fracture Model for Concrete in *Journal of Engineering Mechanics*, **111**, 1227, 1985.
- [23] Z. JIA, A. CASTRO-MONTERO & S.P. SHAH: Observation of Mixed Mode Fracture with Center Notched Disk Specimens in *Cement and Concrete Research*, **26**, 125, 1996.
- [24] R. JONES & C. WYKES: *Holographic and speckle interferometry*, A discussion of the theory, practice and application of the techniques, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge 1989.

- [25] M.F. KAPLAN: Crack Propagation and the Fracture of Concrete in *ACI Journal*, **58**, 591, 1961.
- [26] E.N. LANDIS & S.P. SHAH: The Influence of Microcracking on the Mechanical Behaviour of Cement Based Materials in *Advanced Cement Based Materials*, **2**, 105, 1995.
- [27] E.N. LANDIS & S.P. SHAH: Experimental Measurements of Microfracture in Cement-Based Materials in [45].
- [28] D.A. LANGE, H.M. JENNINGS & S.P. SHAH: Relationship between Fracture Surface Roughness and Fracture Behavior of Cement Paste and Mortar in *Journal of the American Ceramic Society*, **76**, 589, 1993.
- [29] M. LAUBE: *Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Betonbauteilen in jungen Alter*, Dissertation, TU Braunschweig, 1990.
- [30] Z. LI: Microcrack Characterization in Concrete under Uniaxial Tension in *Magazine of Concrete Research*, **48**, 219, 1996.
- [31] A.K. MAJI & J.L. WANG: Experimental Study of Fracture Processes in Rock in *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **25**, 25, 1992.
- [32] H. MIHASHI & K. ROKUGO (HRSG.): *Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS)*, Proceedings of the Third International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS3), Gifu, AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, 1998.
- [33] R.A. MILLER, A. CASTRO-MONTERO & S.P. SHAH: Cohesive Crack Models for Cement Mortar Examined Using Finite-Element Analysis and Laser Holographic Measurements in *Journal of the American Ceramic Society*, **74**, 130, 1991.
- [34] S. MINDESS & S. DIAMOND: The Cracking and Fracture of Mortar in *Matériaux et Constructions*, **15**, 107, 1982.
- [35] M.E. RAISS, J.W. DOUGILL & J.B. NEWMAN: Developement of Fracture Process Zones in Concrete in *Magazine of Concrete Research*, **42**, 193, 1990.
- [36] PH. REGNAULT & E. BRÜHWILER: Holographic Interferometry for the Determination of Fracture Process Zone in Concrete in *Engineering Fracture Mechanics*, **35**, 29, 1990.
- [37] H.W. REINHARDT: Fracture Mechanics of an Elastic Softening Material Like Concrete in *Heron*, **29**, Nr. 2, 1984.
- [38] F.S. ROSTÁSY & M. LAUBE: Zur Laserinterferometrischen Vermessung der Rißprozeßzone des Betonzugbruchs in *Baustoffe, Forschung, Anwendung Bewährung, Festschrift Rupert Springenschmid*, Baustoffinstitut der TU München, 342, 1990.
- [39] S.P. SHAH: Experimental Methods for Determining Fracture Process Zone and Fracture Parameters in *Engineering Fracture Mechanics*, **35**, 3, 1990.
- [40] S.P. SHAH, S.E. SWARTZ & C. OUYANG: *Fracture Mechanics of Concrete*, Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- [41] S.E. SWARTZ & T. REFAI: Cracked Surface Revealed by Dye and its Utility in Determining Fracture Parameters in *Fracture Toughness and Fracture Energy: Test Methods for Concrete and Rock*, ed. by H. MIHASHI, H. TAKAHASHI & F.H. WITTMANN, Balkema, Rotterdam, 1989.
- [42] R.B. TAIT, S. DIAMOND, S.A.S. AKERS & S. MINDESS: Microprocess Failure Zone Studies Using an In Situ Scanning Electron Microscope Double Torsion Test Facility in *Micromechanics of Failure of Quasi-Brittle Materials*, ed. by S.P. SHAH, S.E. SWARTZ & M.L. WANG, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.
- [43] A. TURATSINZE: *Caractérisation microstructurale de la fissuration des bétons et mortiers en mode I de propagation*, Dissertation, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1992.
- [44] J.G.M. VAN MIER: *Fracture Processes of Concrete — Assessment of Material Parameters for Fracture Models*, CRC Press, Boca Raton, New York, London & Tokyo, 1997.
- [45] F.H. WITTMANN (HRSG.): *Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS)*, Proceedings of the Second International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS2), Zürich, AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, 1995.

